

АСИНХРОННЫЙ ТЯГОВЫЙ ПРИВОД ЛОКОМОТИВОВ

Под редакцией А.А. Зарифьяна

*Рекомендовано Экспертным советом по рецензированию
Московского государственного университета путей сообщения,
уполномоченным приказом Минобрнауки России от 15 января 2007 г. № 10,
к использованию в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся
по специальности 190300.65 «Подвижной состав железных дорог» ВПО.
Регистрационный номер рецензии 365 от 2 июля 2012 г.
базового учреждения ФГАУ «Федеральный институт
развития образования»*

Москва
2013

УДК 629.42.02/.06

ББК 39.22-04

A90

Авторы: Введение — *А.А. Зарифьян*; гл. 1 — *В.П. Янов* (пп. 1.1, 1.2, 1.4.1, 1.5), *А.А. Зарифьян* (п. 1.3), *Ю.В. Бабков* (п. 1.4.2); гл. 2 — *А.А. Зарифьян* (п. 2.1), *В.П. Янов* (пп. 2.2.1, 2.3), *Г.Ф. Кашиников* (п. 2.2.2); гл. 3 — *П.Г. Колпахчян* (пп. 3.1, 3.3 кроме п. 3.3.1), *В.П. Янов* (п. 3.3.1), *К.С. Перфильев* (пп. 3.2, 3.5, 3.6), *Г.Ф. Кашиников* (п. 3.4.1), *Ю.В. Бабков* (п. 3.4.2); гл. 4 — *П.Г. Колпахчян* (пп. 4.1, 4.4), *П.Ю. Петров* (пп. 4.2, 4.3), *К.С. Перфильев* (п. 4.5); гл. 5 — *А.А. Андриященко* и *А.А. Зарифьян*; гл. 6 — *А.А. Зарифьян* (пп. 6.1.1, 6.1.2, 6.1.5), *П.Г. Колпахчян* (пп. 6.1.3, 6.1.4, 6.1.5), *В.П. Янов* (пп. 6.2.1, 6.2.2), *Ю.В. Бабков* (п. 6.2.2); приложения П1 и П2 — *В.П. Янов*; приложение П3 — *К.С. Перфильев*

Рецензенты: зам. начальника Департамента технической политики ОАО «РЖД», канд. техн. наук *Д.Л. Киржнер*; главный конструктор проекта ПКБ ЦТ ОАО «РЖД» *В.В. Кобылянский*; профессор кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ПГУПС, д-р техн. наук *А.В. Грищенко*

A90 Асинхронный тяговый привод локомотивов: учеб. пособие /
А.А. Андриященко, Ю.В. Бабков, А.А. Зарифьян и др.; под ред.
А.А. Зарифьяна. — М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по
образованию на железнодорожном транспорте», 2013. — 413 с.
ISBN 978-5-89035-631-4

Рассмотрены вопросы устройства и работы основных элементов асинхронного тягового привода (АТП) локомотивов (электровозов и тепловозов): тяговых преобразователей, асинхронных тяговых двигателей, систем управления. Отмечены особенности механической части локомотивов с АТП. Уделено внимание методам стендовых испытаний, вопросам защиты, электромагнитной совместимости и т.д. Представлены примеры компьютерного моделирования переходных процессов в АТП локомотивов.

Предназначено в качестве учебного пособия аспирантам вузов железнодорожного транспорта, студентам вузов железнодорожного транспорта, обучающихся по специальности 190300.65 «Подвижной состав железных дорог» для углубленного изучения дисциплин «Электрооборудование локомотивов», «Тяговые аппараты и электрооборудование электроподвижного состава», «Электронные преобразователи для электроподвижного состава» и дипломного проектирования, а также научным работникам в области асинхронного тягового привода локомотивов.

УДК 629.42.02/.06

ББК 39.22-04

ISBN 978-5-89035-631-4

© Коллектив авторов, 2013

© ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013

Введение

В соответствии с документом «Типы и основные параметры локомотивов», утвержденным распоряжением МПС России № 747р от 27.10.2002 г., перспективные электровозы и тепловозы должны иметь асинхронный тяговый привод (АТП). Это обеспечит бóльшую осевую мощность, высокую скорость движения, улучшенные тяговые и энергетические характеристики, меньшую стоимость полного жизненного цикла локомотивов.

Такие локомотивы, разработанные с использованием результатов научно-технического прогресса, будут серийно выпускаться российской промышленностью в ближайшее время.

Первые локомотивы с АТП — электровозы ВЛ80^А, ВЛ86^Ф и тепловоз ТЭ120 — были построены в нашей стране в 70—80-х гг. XX в., что позволило получить опыт конструирования и производства, но вместе с тем поставило серьезные проблемы, на решение которых потребовалось немало времени.

В настоящее время на российских железных дорогах эксплуатируются 12 пассажирских электровозов ЭП10 с АТП и 10 грузовых тепловозов 2ТЭ25А «Витязь», оборудованных электрической передачей переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями; происходит накопление практического опыта.

В книге, предлагаемой вниманию читателя, сделана попытка рассмотреть АТП электровоза и электрическую передачу переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями тепловоза с единых позиций, что вполне естественно, так как они имеют много общего.

В учебном пособии кратко изложена эволюция систем тягового электропривода локомотивов, рассмотрены основные этапы его развития.

Описаны устройство и принцип работы асинхронного двигателя, рассмотрены особенности конструкций и характеристики асинхронных тяговых двигателей электровозов и тепловозов.

Подробно рассмотрены вопросы, связанные с устройством тяговых преобразователей — ключевого звена асинхронного элект-

ропривода локомотивов. Приведены примеры реальных конструкций.

Детально изложен материал, связанный с принципами управления асинхронным тяговым приводом, представлены различные способы управления, проанализированы их достоинства и недостатки; показана структура системы управления АТП.

Отмечены особенности механической части локомотивов, обусловленные применением асинхронного тягового привода.

В заключение представлены результаты компьютерного моделирования некоторых штатных и аварийных режимов работы электровоза с АТП, что вызывает практический интерес. Дано описание испытательных стендов, приведены программы и методы испытания асинхронных тяговых двигателей и привода в целом.

Учебное пособие предназначено для студентов вузов железнодорожного транспорта, но будет полезно и техническому персоналу, занятому эксплуатацией и ремонтом локомотивов с асинхронным тяговым приводом, а также инженерно-техническим работникам, занимающимся проектированием подвижного состава с АТП.

Авторы признательны инженерам Н.В. Гребенникову и А.В. Козубенко за подготовку иллюстративного материала к книге.

Глава 1. ЭВОЛЮЦИЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛОКОМОТИВОВ

В главе 1 освещена роль железнодорожного транспорта в экономике нашей страны, дан прогноз роста объемов перевозок на период до 2030 г. Изложены этапы развития тягового электропривода локомотивов — тепловозов с электрической передачей мощности и электровозов.

Дано описание конструкций опытных локомотивов с асинхронным тяговым приводом, выпущенных ранее отечественной промышленностью.

Сформулированы требования к перспективному тяговому подвижному составу, определенные действующим «Типажом».

Рекомендуется ознакомиться со следующими источниками (список литературы находится в конце книги): [1–4, 6, 10, 11, 16, 17, 19, 20, 23].

1.1. Роль железнодорожного транспорта в экономике Российской Федерации

Транспорт, наряду с добывающей и обрабатывающей промышленностью и сельским хозяйством, является сферой материального производства. Огромно его влияние на экономику, стратегическую безопасность страны и социальное развитие общества.

В России основной объем транспортной работы выполняется на магистральных железных дорогах (табл. 1.1), где осуществляется практически 90 % грузовых и более 40 % пассажирских перевозок.

Таблица 1.1

Грузооборот различных видов транспорта в Российской Федерации (2007 г.)

Вид транспорта	Грузооборот	
	млрд т·км	%
Железнодорожный магистральный	2090,3	89,9
Железнодорожный промышленный	7,5	0,3
Автомобильный	79,1	3,4
Морской	61,9	2,7
Внутренний водный	83,7	3,6
Воздушный	3,4	0,15

Такая роль железных дорог обусловлена прежде всего тем, что наша страна занимает большую сухопутную территорию, причем

месторождения полезных ископаемых и источники энергоресурсов удалены от промышленных центров. Сельское хозяйство районировано, характерна сезонная миграция населения. Еще большее значение имеет то, что железнодорожный транспорт, по сравнению с другими видами транспорта, имеет наименьшие затраты энергии на единицу полезной работы и лучшие показатели по воздействию на окружающую среду (табл. 1.2).

Таблица 1.2

**Сравнительные удельные затраты энергии и коэффициенты загрязнения
различных видов транспорта**

Вид транспорта	Удельный расход энергии	Удельный коэффициент загрязнения
Железнодорожный	1,0	1,0
Автомобильный пассажирский	3,5	8,3
Автомобильный грузовой	8,7	30
Водный	2,0	3,3

Перевозочная работа на магистральных железных дорогах осуществляется локомотивами — электровозами и тепловозами. Наиболее грузонапряженные направления электрифицированы. При протяженности электрифицированных линий около 50 % общей сети дорог на них выполняется более 80 % грузооборота. Это определяется тем, что электровоз, по сравнению с тепловозом, имеет существенно большую единичную мощность, а удельный расход условного топлива и себестоимость перевозок на электрифицированных линиях, по статистическим данным, в 1,5—2,0 раза ниже, чем при тепловозной тяге (см. Приложение П1).

Как следует из Приложения П1 средний вес грузового поезда при электрической тяге больше почти на 20 % по сравнению с тепловозной, участковая скорость движения грузового поезда — больше на 25 %, среднесуточный пробег — на 40 %, а производительность — более чем в 2 раза.

Выбор типа тяги как для действующих, так и для вновь строящихся железных дорог является сложной технико-экономической задачей. Внедрение электрической тяги требует гораздо больших капитальных затрат по сравнению с тепловозной. Сроки окупаемости затрат зависят от многих факторов, которые необходимо учитывать для обеспечения рационального разделения сфер их применения.

Большое влияние на выбор решения оказывает соотношение цен на энергоносители и материалы, уровень зарплат, формы собственности железных дорог и источников энергоснабжения, объем затрат на решение сопутствующих социальных проблем и т.д.

Например, низкий уровень электрификации железных дорог в США и Канаде имеет место по той причине, что стоимость создания систем тягового энергоснабжения очень высока, а частные фирмы, которым принадлежат железные дороги, не имеют возможности вкладывать большие средства на длительный срок.

В некоторых европейских странах применяются дифференцированные по времени суток тарифы на электроэнергию, способствующие выравниванию суточных графиков нагрузок энергосистем за счет интенсивного грузового движения в ночные часы, что стимулирует электрификацию железных дорог.

Определение сферы применения различных типов тяги осложняется еще и тем, что в ходе технического прогресса зачастую меняются параметры технических средств, влияющих на экономику перевозок.

Решение всех экономических и технических проблем на железнодорожном транспорте тесно связано с социальными, оборонными и политическими аспектами.

Каждый вид тяги имеет свой полигон, на котором наиболее полно проявляются преимущества и возможности каждого из них. Сопоставление эффективности видов тяги должно производиться в одинаковых условиях по профилю пути, объему работ, климатическим условиям и т.д. При этом сравниваются размеры движения, величины провозной и пропускной способности, веса и скорости движения, а также парк локомотивов и вагонов, т.е. при каком размере инвестиций и эксплуатационных затрат будут освоены грузо- и пассажиропотоки при каждом виде тяги.

Как показывают теоретические расчеты и опыт эксплуатации, с ростом объема грузовых и пассажирских перевозок наступает момент, когда возможности тепловозной тяги исчерпываются и наступает время перевода линий на электрическую тягу.

Общие инвестиции капитальных затрат на электрификацию участков железной дороги можно представить как:

$$K_{\text{эл.т}} = K_{\text{п}} + K_{\text{кс}} + K_{\text{пр}} + K_{\text{дх}} + K_{\text{эл}} + K_{\text{в}} + K_{\text{эс}} + K_{\text{рз}} + K_{\text{пут}} + K_{\text{дол}},$$

где $K_{\text{п}}$ — затраты на тяговые подстанции;

$K_{\text{кс}}$ — то же, на контактную сеть;

$K_{\text{пр}}$ — то же, на обеспечение энергоснабжения тяговых подстанций;

$K_{\text{дх}}$ — то же, на модернизацию локомотивных депо;

$K_{\text{эл}}$ — то же, на электроподвижной состав;

$K_{\text{в}}$ — то же, на вагонный парк;

$K_{\text{эс}}$ — то же, на создание источников энергопитания (генерирующих мощностей) при отсутствии резервов в энергосистеме;

$K_{\text{рз}}$ — то же, на создание системы ремонта электроподвижного состава;

$K_{\text{пут}}$ — то же, на модернизацию и развитие путевого хозяйства, удлинение прямо-отправочных путей, если они ограничивают вес поездов при электрической тяге, и т.д.;

$K_{\text{дол}}$ — то же, на долевое участие в электрификации нетяговых потребителей.

При переводе на электрическую тягу уже действующих участков железных дорог, кроме того, оценивается остаточная стоимость локомотивов и специфической инфраструктуры, необходимой для обслуживания тепловозов, которые могут быть проданы (переданы) другим потребителям.

Целесообразность затрат на электрификацию новых линий оценивается по тому, на сколько при этом уменьшаются эксплуатационные расходы и себестоимость перевозок по сравнению с тепловозной тягой.

В себестоимости перевозок отражаются все качественные показатели, зависящие от вида тяги. Сравнение при этом целесообразно вести в целом и по отдельным видам затрат. Затраты, не зависящие от вида тяги, в расчете не учитываются.

Наиболее весомыми статьями эксплуатационных затрат являются затраты на электрическую энергию и топливо, заработную плату, обслуживание и ремонт тягового подвижного состава, ремонт и содержание устройств, связанных с обеспечением электроэнергией и топливом.

Кроме того, при оценке затрат на энергоносители необходимо прогнозировать динамику изменения цен и соотношения цен на электроэнергию и дизельное топливо, а также различия в ценах в зависимости от региона, в котором находится железная дорога.

В целом удельные энергозатраты на тягу поездов зависят от профиля эксплуатируемого участка, режимов работы локомотивов

(веса поезда, участковых и максимально допустимых скоростей и др.), типа локомотива и других факторов.

Размер затрат на обслуживание и ремонт вытекает из параметров, установленных регламентом для каждого типа локомотива, периодичности и объемов выполняемых при этом работ. При переходе к обслуживанию локомотивов в эксплуатации силами предприятий-поставщиков эти затраты могут включаться в цену локомотива.

Расчеты показывают, что пропускная способность участков железных дорог при электрической тяге на 25—30 % больше, чем при тепловозной. При сложных профилях преимущество электрической тяги еще больше и на профилях с уклоном $i \geq 9 \text{ ‰}$ достигает 40 %.

Парк локомотивов при электрической тяге меньше на 30—40 %, чем при тепловозной, а количество вагонов, необходимых для выполнения одинаковых объемов перевозок, меньше на 25—60 % в зависимости от типов локомотивов и характеристик эксплуатируемого участка.

Одним из главных критериев, который определяет переход от тепловозной тяги на электрическую, является необходимость повышения пропускной и провозной способности железнодорожных линий.

Следует также отметить, что выбор типа тяги на том или ином участке (направлении) — задача более широкая, чем обеспечение экономической эффективности конкретной железной дороги. При ее решении следует учитывать:

- степень удовлетворения общества в грузовых и пассажирских перевозках;
- рост экономических характеристик перевозочного процесса;
- повышение энерговооруженности труда железнодорожников и в сопровождающих отраслях;
- снижение массы грузов, находящихся в пути;
- уменьшение металлоемкости и материалоемкости на единицу полезной транспортной работы;
- влияние уровня образования и квалификации рабочих и служащих, занятых в системе перевозок;
- улучшение условий труда персонала, занятого эксплуатацией и ремонтом тягового подвижного состава;
- изменение вредного воздействия на окружающую среду.

Исследования и опыт эксплуатации показали, что каждый вид тяги в зависимости от конкретных условий имеет свой полигон, на котором его достоинства проявляются более полно.

1.2. Программа развития железных дорог РФ до 2030 г.

Главенство магистральных железных дорог в удовлетворении транспортных потребностей страны сохранится на весь обозримый исторический период.

Поэтому при разработке программы преследовалась цель максимально обеспечить возможные потребности экономики страны в перевозках, иметь достаточный запас провозной способности и опережать в развитии железных дорог грузообразующие отрасли.

При устойчивом развитии экономики Советского Союза годовой прирост объемов перевозок составлял 6—8 %. В России после кризиса экономики конца 90-х гг. XX в. прирост был еще выше. Рост грузонапряженности показан на рис. 1.1; за восемь лет XXI в. она выросла в 1,5 раза.

Это позволяет прогнозировать темпы развития железных дорог на ближайшее время. Предстоит освоить новые месторождения природных ископаемых, 60 % которых сосредоточены в удаленных северных и восточных регионах, что требует создания надежных транспортных систем, способных работать круглогодично.

Строительство новых железных дорог потребуется и для интеграции в международную транспортную сеть, в том числе в скоростные коридоры. Развитие транспортных коридоров является приоритетным в планах развития экономики страны. Прежде всего это касается увеличения объемов перевозок между странами Европы и Азии по Транссибирской магистрали.

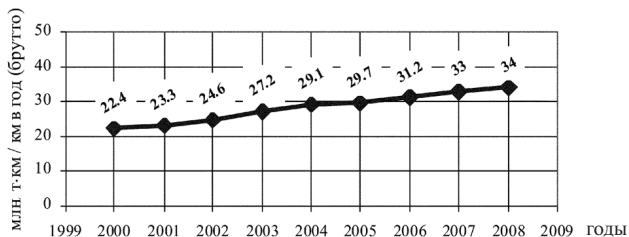


Рис. 1.1. Грузонапряженность железных дорог России

Необходимо улучшить межрегиональные железнодорожные сообщения, особенно в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке.

По прогнозам протяженность железнодорожных линий до 2030 г. может увеличиться на 15 тыс. км, т.е. на 15—17 % к протяженности сети начала XXI в.

В числе реализуемых и прорабатываемых проектов — Амуро-Якутская магистраль с выходом на Якутск и Магадан, а в более отдаленной перспективе — к Берингову проливу с возможностью соединения с железнодорожными системами США и Канады. Другой проект — это линия, которая обеспечит освоение природных богатств Северного Урала и Западной Сибири с выходом на Салехард и Печору, соединит действующую сеть железных дорог с линией Норильск—Дудинка.

Протяженность железнодорожной сети увеличится также за счет создания линий высокоскоростного пассажирского движения со скоростями до 300 км/ч. В первую очередь это будут линии Москва—Санкт-Петербург, Москва—Нижний Новгород, Москва—Минск—Брест, Центр—Юг с интеграцией их в европейские транспортные коридоры.

Объем работ, выполняемых железными дорогами развитых стран, в том числе и Российской Федерации, будет в обозримый период возрастать как за счет увеличения общего объема перевозок, так и за счет передачи части грузовых перевозок с других видов транспорта, и прежде всего с автомобильного, на железную дорогу. В Германии, например, запланировано до 2020 г. удвоить объем грузов, перевозимых железными дорогами, сократив соответственно долю грузовых перевозок автотранспортом. По мнению английских специалистов, без увеличения объемов грузовых перевозок железнодорожным транспортом за счет уменьшения доли перевозок автомобилями нельзя решить задачу роста промышленного производства. Необходимые меры предусмотрены в десятилетнем плане развития экономики Великобритании.

Одним из путей повышения провозной и пропускной способности существующих железнодорожных магистралей является расширение полигона электрификации и использование локомотивов с более высокими эксплуатационными характеристиками. Это подтверждается и прогнозируемым соотношением цен на электроэнергию и дизельное топливо.

Планы развития железнодорожного транспорта в России предусматривают, что в ближайшее время будет переводиться на электрическую тягу 400—500 км в год. Общая протяженность электрифицированных линий к 2015 г. составит при этом более 52 % сети; на них будет осуществляться около 85 % общего объема перевозок. Электрификация преследует цель снизить себестоимость перевозок, повысить провозную и пропускную способность эксплуатируемых участков. Новые железнодорожные линии будут строиться с электрической тягой или с расчетом на последующую электрификацию.

Электрификация, по крайней мере в первой половине XXI в., будет вестись в основном на переменном токе 25 кВ, 50 Гц. Отметим, что стоимость 1 кВт·ч электроэнергии переменного тока составляет около 70 % стоимости 1 кВт·ч энергии постоянного тока.

В отдаленной перспективе возможно создание систем электрификации на напряжении 12 или 24 кВ постоянного тока и 50 кВ, 50 Гц переменного тока.

Следует иметь в виду, что замена тепловозной тяги на электрическую осуществляется только после выполнения тщательных экономических расчетов для каждого электрифицируемого участка. При этом учитываются объемы перевозок, в том числе в перспективе, обеспеченность энергоресурсами, состояние инфраструктуры, и другие факторы.

Учитывается также военно-стратегическое значение тепловозной тяги и социальное значение железнодорожного транспорта для жизнеобеспечения удаленных и менее развитых регионов; такой подход к выбору видов тяги представляется оптимальным для условий нашей страны.

1.3. Этапы развития тягового электропривода локомотивов

Экономические показатели железнодорожных перевозок в значительной степени определяются характеристиками магистральных локомотивов: электровозов и тепловозов. По этой причине достижения науки и техники очень быстро находят свое применение на железнодорожном транспорте. Достаточно вспомнить историю развития тягового подвижного состава в XIX и XX вв.: использование паровой машины, электропривода, двигателя внутреннего сгорания.

И в прежние времена и сейчас, в XXI в., использование достижений науки при создании локомотивов обеспечивало улучшение их эксплуатационных характеристик и снижение затрат на перемещение грузов и пассажиров. Только за несколько последних десятилетий это позволило повысить единичную мощность серийно выпускаемых электровозов и тепловозов в 2,5—3,0 раза, а силу тяги в 2,0—2,5 раза.

Электрический локомотив (*электровоз*) получает энергию, необходимую для ведения поезда, из контактной сети постоянного либо переменного тока, которая может рассматриваться как источник практически бесконечной мощности.

Находящиеся в эксплуатации электровозы оснащены практически исключительно коллекторными тяговыми двигателями постоянного или пульсирующего тока. Начат выпуск электровозов с асинхронными тяговыми двигателями и микропроцессорными системами управления.

Автономный локомотив (*тепловоз*) несет на себе запас топлива и первичный двигатель — как правило, дизель. На тягу может быть направлена только конечная мощность этого двигателя — в отличие от электровоза, для которого контактная сеть является источником бесконечной мощности. Как следствие на первый план выдвигается проблема полного использования мощности двигателя.

Для передачи мощности от вала первичного двигателя к движущим осям магистральных и части маневровых тепловозов используется электрическая передача, представляющая собой совокупность электрического генератора, устройств регулирования и управления и тяговых электродвигателей (ТЭД).

В развитии электрических передач мощности (ЭПМ) тепловозов можно отметить следующие этапы:

- ЭПМ постоянного тока, где используются генераторы и ТЭД постоянного тока, электромашинные либо аппаратные системы регулирования напряжения тягового генератора;

- ЭПМ переменного-постоянного тока, где используются синхронные генераторы, полупроводниковые выпрямительные установки и коллекторные ТЭД постоянного тока. Здесь находят применение либо аппаратные, либо — на современных локомотивах — микропроцессорные системы управления;

- ЭПМ переменного тока, где используются синхронные генераторы, статические выпрямительно-инверторные преобразо-

ватели, бесколлекторные ТЭД переменного тока и микропроцессорные системы управления. ЭПМ переменного тока, в которой применяются асинхронные тяговые двигатели, может быть названа асинхронным тяговым приводом локомотива.

Можно выделить три этапа развития тягового электропривода локомотивов по применяемому способу преобразования энергии (табл. 1.3).

Ниже в п. 1.3.1—1.3.4 приведено краткое описание систем преобразования электрической энергии, применявшихся на первом и втором этапах развития. Весь остальной материал учебного пособия посвящен третьему этапу.

Таблица 1.3

Этапы развития тягового электропривода локомотивов

Этап 1	Электровозы постоянного тока с коллекторными ТЭД постоянного тока	Тепловозы с ЭПМ постоянного тока
Этап 2	Электровозы переменного тока с коллекторными ТЭД пульсирующего тока	Тепловозы с ЭПМ переменного постоянного тока
Этап 3	Электровозы с асинхронными тяговыми двигателями	Тепловозы с ЭПМ переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями

1.3.1. Электровозы постоянного тока с коллекторными ТЭД постоянного тока

Электровозы постоянного тока с коллекторными тяговыми двигателями начали работать на железных дорогах нашей страны в 30-х гг. XX в. В настоящее время в эксплуатации находятся грузовые электровозы ВЛ10, ВЛ11 и ВЛ15, пассажирские электровозы ЧС2 и ЧС7. Начат выпуск новых типов электровозов постоянного тока — грузовых 2ЭС4К «Дончак» и 2ЭС6К, пассажирского ЭП2К.

Простота электрической части и высокий КПД электровозов постоянного тока при работе на естественной характеристике являются их основными преимуществами.

На таких электровозах применяются коллекторные ТЭД постоянного тока (рис. 1.2), как правило, последовательного возбуждения. Исключение составляет электровоз 2ЭС4К, где применяется комбинированное (независимое и последовательное) возбуждение.

Электромагнитный момент на валу ТЭД, Н·м, равен

$$M = C_m \Phi(I_B) I_a, \quad (1.1)$$

где $\Phi(I_B)$ — магнитный поток системы возбуждения, приходящий на одно полюсное деление, Вб;

I_B — ток в обмотке возбуждения, А;

I_a — ток в якровой цепи, А;

$C_m = \frac{pN}{2a\pi}$, Н·м/(Вб·А) — машинная постоянная;

p — число пар главных полюсов;

N — число проводников обмотки якоря;

a — число параллельных ветвей обмотки якоря.

ПротивоЭДС двигателя, В, определяется по формуле

$$E = C_e \Phi(I_B) n, \quad (1.2)$$

где n — частота вращения вала ТЭД, об/мин;

$C_e = \frac{pN}{60a}$ — конструкционная постоянная, В/(Вб·об/мин), причем

$$C_e = \frac{2\pi}{60} C_m.$$

Мощность ТЭД, Вт, равна

$$P = M\omega = \frac{2\pi}{60} Mn = C_e \Phi(I_B) n I_a = E I_a, \quad (1.3)$$

где ω — угловая скорость вращения вала двигателя, рад/с.

На рис. 1.3 приведена зависимость $E/\omega = C_m \Phi = f(I_B)$ (так называемая кривая намагничивания) для тягового электродвигателя ТЛ-2К1.

Напряжение, подводимое к ТЭД, расходуется на уравнивание противоЭДС двигателя и на падение напряжения во внутренних цепях:

$$U = E + I_a \sum r = C_e \Phi n + I_a \sum r, \quad (1.4)$$

где $\sum r$ — падение напряжения во внутренних цепях, В.

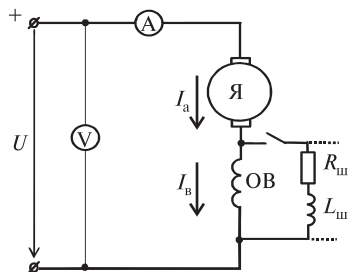


Рис. 1.2. Схема подключения коллекторного ТЭД последовательного возбуждения: Я — якорь; ОВ — обмотка возбуждения; I_a — ток в якровой цепи; I_B — ток в обмотке возбуждения; $R_{ш}$ — резистор шунтировки обмотки возбуждения; $L_{ш}$ — индуктивность шунтировки; U — напряжение; А, V — датчики тока и напряжения

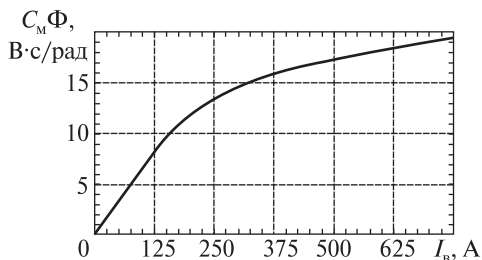


Рис. 1.3. Кривая намагничивания (холод- того хода) тягового двигателя ТЛ-2К1

Сила тока в цепи якоря

$$I_a = \frac{U - C_e \Phi n}{\sum r}. \quad (1.5)$$

Достоинства коллектор- ных ТЭД последовательно- го возбуждения, послужив- шие причиной их широко- го применения на тяговом подвижном составе, заклю- чаются в простоте регули- рования частоты вращения

и возможности создания большого пускового момента. Примене- ние независимого возбуждения позволяет в принципе еще более увеличить пусковой момент, но требует усложнения конструкции (наличия дополнительного силового оборудования и микропро- цессорной системы управления для регулирования тока возбужде- ния, двигателей специальной конструкции и т.д.).

К числу основных недостатков коллекторных ТЭД относятся большой расход цветных металлов на единицу мощности, что уве- личивает их стоимость, и наличие подвижного контакта в силовой цепи (коллекторно-щеточный узел), что влечет за собой снижение надежности и увеличение расходов при эксплуатации.

Характеристики некоторых ТЭД электровозов приведены в табл. 1.4.

Из выражения (1.4) определяем частоту n вращения якоря ТЭД постоянного тока:

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{C_e \Phi}. \quad (1.6)$$

Из формулы (1.6) вытекают три способа регулирования режи- мов работы двигателя.

1-й способ. Поскольку частота n практически пропорциональна подведенному к ТЭД напряжению U (падение напряжения $I_a \sum r$ во внутренних цепях двигателя составляет всего несколько про- центов от напряжения U , подведенного к ТЭД), для изменения частоты вращения применяется переключение схемы соединения (перегруппировка) двигателей.

Таблица 1.4

Технические характеристики коллекторных ТЭД электровозов

Тип тягового двигателя	Серия электровоза	Мощность, кВт		Напряжение длительного режима, В		Ток, А		Частота вращения, об/мин		Масса, кг	Удельная масса, кг/кВт
		Часовая	Длительная	Часового режима		Длительный	Длительная	Максимальная			
ТЭД постоянного тока											
ТЛ-2К1		670	575	1500	480	410	790	1625	4700	7,0	
ДТК-800А		800	740	1500	570	525	765	1720	4600	5,75	
АЛ4846Т		700	618	1500	495	435	630	1150	5250	7,5	
ДТК-800КЭ		825	735	1500	585	520	1000	1780	3850	4,7	
ТЭД пульсирующего тока											
НБ-418К6		790	740	950	880	820	915	1950	4350	5,5	
НБ-514Б		820	765	1000	870	810	940	2040	4300	5,2	
АЛ444нР		850	820	800	1140	1100	1215	1860	2950	3,5	
НБ-520В		800	750	1000	845	795	1050	2020	3500	4,4	

Например, на двухсекционном восьмиосном электровозе ВЛ10 возможно последовательное (С) соединение всех восьми ТЭД, последовательно-параллельное (СП) соединение двумя параллельными группами по четыре двигателя и параллельное (П) соединение четырех групп по два двигателя (рис. 1.4).

При соединении С напряжение U на каждом двигателе составляет $1/8$ напряжения контактной сети, т.е. $U = U_{\text{КС}} / 8 = 375 \text{ В}$, и через каждый двигатель протекает полный ток, потребляемый электровозом из контактной сети: $I_a = I_{\text{КС}}$. В результате согласно (1.1) на малой скорости движения создается большой тяговый момент.

При соединении СП напряжение U на каждом двигателе составляет $1/4$ напряжения контактной сети, т.е. $U = U_{\text{КС}} / 4 = 750 \text{ В}$, а через каждый двигатель протекает половина тока, потребляемого электровозом из контактной сети: $I_a = 1/2 I_{\text{КС}}$. В результате скорость движения возрастает, а тяга уменьшается.

При соединении П напряжение U на каждом двигателе составляет $1/2$ напряжения контактной сети, т.е. $U = U_{\text{КС}} / 2 = 1500 \text{ В}$,

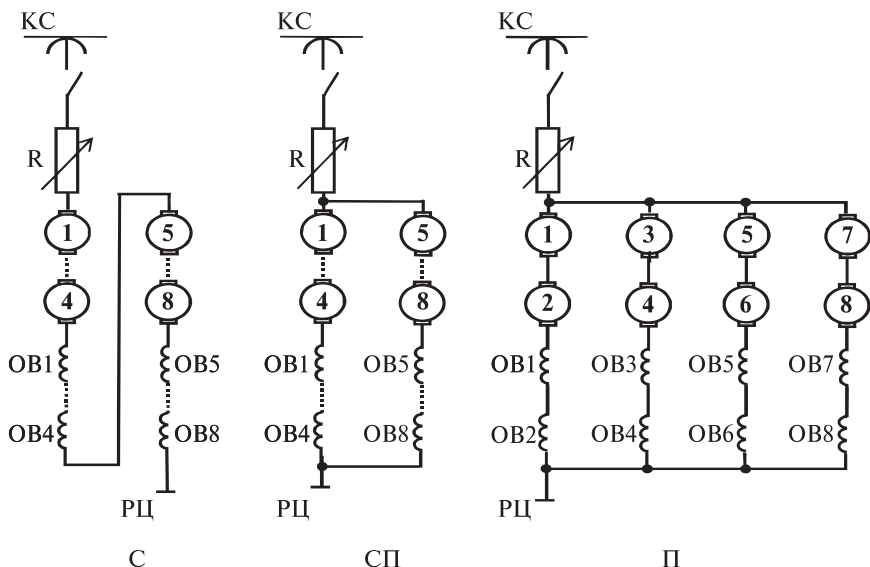


Рис. 1.4. Последовательное (С), последовательно-параллельное (СП) и параллельное (П) соединение ТЭД; ОВ — обмотка возбуждения; КС — контактная сеть; РЦ — рельсовая цепь; R — реостат

а через каждый двигатель протекает четверть тока, потребляемого электровозом из контактной сети: $I_a = 1/4 I_{\text{к.с.}}$. В результате скорость движения еще более возрастает, а тяга становится минимальной.

2-й способ. Как уже было сказано, падение напряжения $I_a \sum r$ во внутренних цепях двигателя невелико, оно составляет всего несколько процентов от подведенного к ТЭД напряжения U . Если же в якорную цепь подключить дополнительное сопротивление (пусковой реостат R , показан на рис. 1.4), получаем возможность плавного регулирования скорости при трогании с места и разгоне.

3-й способ. Согласно (1.6) частота n обратно пропорциональна величине магнитного потока Φ . Наибольшее распространение получила система ступенчатого изменения магнитного потока путем шунтирования главных полюсов, как наиболее простая по конструкции.

В этом случае (см. рис. 1.2) параллельно обмотке возбуждения ОВ тягового электродвигателя подключается резистор $R_{\text{ш}}$, часть тока якоря отводится через него от обмотки возбуждения и магнитный поток полюсов тягового электродвигателя уменьшается. Включение в параллель дополнительных резисторов дает возможность получения двух и более ступеней ослабления магнитного потока.

Отношение тока обмотки возбуждения $I_{\text{в}}$ к току якоря $I_{\text{а}}$ носит название коэффициента ослабления возбуждения $\alpha_{\text{в}}$:

$$\alpha_{\text{в}} = \frac{I_{\text{в}}}{I_{\text{а}}} = \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{в}} + R_{\text{ш}}}. \quad (1.7)$$

На электровозе ВЛ10 кроме полного поля имеются четыре ступени ослабления (коэффициенты 0,75; 0,55; 0,43; 0,36); на электровозах ЧС2 — пять ступеней (0,85; 0,70; 0,575; 0,475; 0,40).

Перечисленные выше три способа регулирования частоты вращения ТЭД являются классическими (контактно-реостатное управление). Они были использованы на первых электровозах в начале XX в. и в основном остались без принципиальных изменений на электровозах эксплуатируемого парка и современной разработки.

Недостаток этих способов связан в основном со значительными потерями энергии в пусковых резисторах, а также со ступенчатым

характером как изменения напряжения, подаваемого на двигатели, так и ослабления поля. При этом происходит резкое изменение тока, ухудшаются коммутационные условия на коллекторе ТЭД, возникают предпосылки для возникновения боксования, искрения и кругового огня.

К недостаткам схемы относится также большое число контакторов, при помощи которых осуществляются все переключения.

Управление работой электровоза ВЛ10 осуществляется при помощи контроллера машиниста, который имеет два кулачковых вала: главный и тормозной. Валы приводятся в движение двумя рукоятками: главной и тормозной, которые связаны с соответствующими зубчатыми передачами. Имеется 37 позиций контроллера машиниста, из них 16-я, 27-я и 37-я являются ходовыми (при соединениях С, СП и П соответственно), так как на этих позициях в якорных цепях ТЭД отсутствуют регулировочные сопротивления. Таким образом, воздействие машиниста на локомотив (говоря компьютерным языком, «человеко-машинный интерфейс») реализуется аппаратным путем.

Новые электровозы 2ЭС4К, 2ЭС6 и ЭП2К оснащены микропроцессорными системами управления и диагностики, обеспечивающими ручное и автоматическое управление движением, режимы автоведения поезда, индикацию параметров движения и диагностику работы оборудования электровоза.

Рекуперативное торможение осуществляется при независимом возбуждении ТЭД, переведенных в генераторный режим. Обмотка возбуждения ТЭД запитывается от вращающегося возбудителя (на старых электровозах) либо от статического преобразователя (на более современных).

Напряжение, на которое должна быть выполнена изоляция силовых и вспомогательных цепей электровозов постоянного тока, определяется напряжением контактной сети $U_{\text{кк}}$, что не позволяет применить оптимальные варианты по критериям минимальной стоимости, массогабаритным показателям, надежности и т.д.

Контакторно-реостатная система формирования напряжения на ТЭД в принципе может быть заменена импульсным регулятором напряжения (ИРН), который выполнен на силовых управляемых полупроводниковых приборах — тиристорах или транзисторах. В такой схеме регулирование напряжения на двигателях (от

нуля до максимального значения) осуществляется плавно и без существенных потерь, поэтому отпадает необходимость не только в резисторах, но и в переключении группировок ТЭД. Однако на электровозах отечественного производства, оснащенных коллекторными ТЭД, ИРН применения не нашли. Описание схемы питания электровозов постоянного тока с асинхронными тяговыми двигателями, где ИРН применяются в качестве входного звена тягового преобразователя, приведено в п. 3.3.1.

1.3.2. Тепловозы с электропередачей постоянного тока

Одним из основных требований, предъявляемых к электрической передаче тепловозов, является полное использование на тягу свободной мощности дизеля во всех условиях движения. Свободная мощность дизеля N равна его эффективной мощности за вычетом мощности, расходуемой на вспомогательные нужды.

Экономичная работа дизеля возможна лишь в установившемся режиме, когда угловая скорость вращения коленчатого вала ω фиксированна (согласно набранной позиции контроллера машиниста) и мощность на валу дизеля постоянна. Тяговый генератор преобразует свободную мощность N дизеля в электрическую мощность P_{Γ} (потери учитываются коэффициентом полезного действия генератора η):

$$P_{\Gamma} = \eta N = \text{const},$$

откуда

$$U_{\Gamma} I_{\Gamma} = \eta M \omega = \text{const}, \quad (1.8)$$

что и определяет необходимость формирования гиперболической внешней характеристики генератора для наиболее полного использования свободной мощности дизеля (так называемая тепловозная характеристика).

Графически постоянство мощности выражается внешней характеристикой — зависимостью напряжения генератора U_{Γ} от тока генератора I_{Γ} на выбранной машинистом позиции контроллера (рис. 1.5).

Гиперболический участок BC соответствует постоянной мощности, участок AB обеспечивает ограничение максимального тока при трогании с места, а участок CD — ограничение напряжения при движении на больших скоростях.

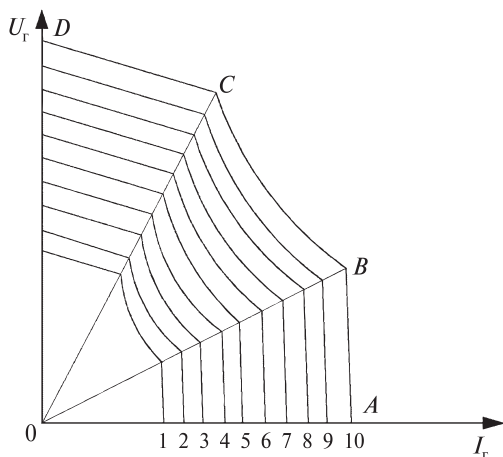


Рис. 1.5. Внешняя характеристика тягового генератора в зависимости от набранной позиции КМ: 1—10 — номера позиций

Максимальное значение тока генератора I_G определяется максимальным током тяговых двигателей в момент трогания тепловоза с места. При разгоне ток генератора уменьшается.

Максимальное значение напряжения генератора U_G должно быть достаточным для обеспечения конструкционной скорости движения тепловоза (с учетом характеристик ТЭД). При уменьшении скорости движения напряжение падает.

Три этапа развития электрических передач тепловозов показаны в табл. 1.3. Принципиальная схема электрической передачи мощности постоянного тока, применявшейся на этапе 1, приведена на рис. 1.6.

Ее основными элементами являются:

— тяговый генератор постоянного тока (ТГ) с независимым возбуждением, вал которого приводится во вращение от вала дизеля.

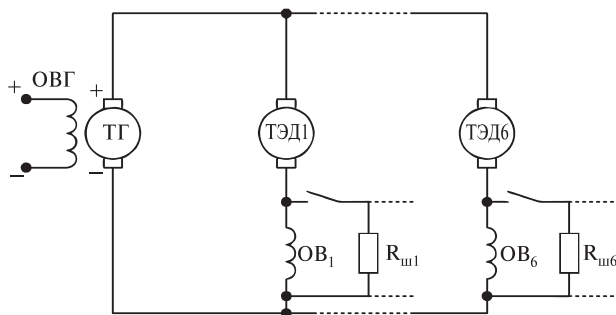


Рис. 1.6. Принципиальная схема электрической передачи постоянного тока (параллельное соединение ТЭД): ТГ — тяговый генератор; ТЭД — тяговый электродвигатель; ОВГ — обмотка возбуждения генератора; ОВ — обмотки возбуждения ТЭД

При заданной позиции контроллера машиниста генератор подает на тяговые электродвигатели постоянную электрическую мощность при переменных значениях тока и напряжения согласно (1.8), что позволяет гибко приспосабливаться к условиям ведения поезда, варьируя силу тяги и скорость движения;

– коллекторные ТЭД постоянного тока с последовательным возбуждением, приводящие во вращение колесные пары локомотива. Они также позволяют изменять силу тяги и скорость — за счет ослабления поля возбуждения.

Первые тепловозы конструкции Я.М. Гаккеля и Ю.В. Ломоносова были оснащены ЭПМ постоянного тока. Наиболее широкое применение она нашла на тепловозах выпуска 40—60-х гг. XX в., однако маневровые тепловозы с ЭПМ постоянного тока выпускаются и в настоящее время.

В эксплуатации находятся магистральные грузовые тепловозы 2ТЭ10 и М62, пассажирские ТЭП60, а также маневровые ТЭМ2, ЧМЭ3 и ТЭМ18ДМ.

Технические характеристики ТГ и ТЭД некоторых тепловозов с ЭПМ постоянного тока приведены в табл. 1.5 и 1.6.

Таблица 1.5

Технические характеристики тяговых генераторов тепловозов с ЭПМ постоянного тока

Тип тягового генератора	Серия тепловоза	Мощность, кВт	Ток продолжительного режима, А	Напряжение, В (числитель — максимальное, знаменатель — номинальное)	Частота вращения, об/мин	Масса, кг	Удельная масса, кг/кВт
ГП311Б	2ТЭ10М, 3ТЭ10М, 2ТЭ10Л, 2ТЭ10В	2000	4320	700/465	850	8900	4,45
ГП312	М62, 2М62	1270	3570	570/365	750	7400	5,8
ГП311В	ТЭП60, 2ТЭП60	2000	4320	635/465	750	9000	4,5
ГП300Б	ТЭМ2, ТЭМ2М	780	1210	870/645	750	5000	6,4
TD-802	ЧМЭ3	885	1565	565/377	750	4700	5,3

Примечание. Возбуждение — независимое для всех типов генераторов.

ЭПМ постоянного тока выполняют с постоянным соединением тяговых генераторов и электродвигателей, а управление осуществ-

вляется изменением напряжения тягового генератора и магнитного потока электродвигателей.

Таблица 1.6

Технические характеристики ТЭД тепловозов с ЭПМ постоянного тока

Тип тягового двигателя	Серия тепловоза	Мощность, кВт	Ток продолжительного режима, А	Напряжение длительное, В	Частота вращения, об/мин		Масса, кг	Удельная масса, кг/кВт
					Длительная	Максимальная		
ЭД-118А	2ТЭ10М, 3ТЭ10М, 2ТЭ10Л, 2ТЭ10В	305	720	463	585	2290	3100	10,2
ЭД-107А	М62, 2М62	193	595	356	474	2290	3100	16
ЭД-108А	ТЭП60, 2ТЭП60	305	700	475	610	1870	3350	11
ЭД-118А	ТЭМ2, ТЭМ2М	105	605	203	247	1300	3100	29,5
ТЕ-006	ЧМЭ3	123	750	197	295	1660	2450	19,9

Характеристики напряжения тягового генератора постоянного тока. Главной технической проблемой первых тепловозов с электрической передачей являлось регулирование напряжения тягового генератора с целью формирования гиперболической внешней характеристики (1.8), соответствующей постоянной мощности, подводимой к генератору от дизеля при заданной позиции контроллера машиниста.

Напряжение U_{Γ} на клеммах генератора постоянного тока равно ЭДС за вычетом падения напряжения в цепи якоря

$$U_{\Gamma} = E - I_{\Gamma} \sum r, \quad (1.9)$$

где $E = C_{\Phi} n$ — ЭДС генератора, В;

C_{Φ} — конструкционная постоянная;

Φ — магнитный поток на одно полюсное деление, Вб;

n — частота вращения вала генератора, об/мин;

I_{Γ} — ток генератора, А;

$\sum r$ — полное сопротивление цепи якоря, Ом.

Насыщение магнитной цепи учитывается с помощью кривой намагничивания $\Phi = f(i_B)$, где Φ — магнитный поток системы возбуждения, а i_B — намагничивающий ток (ток возбуждения).

Ток генератора I_T определяется условиями ведения поезда, т.е. представляет собой нагрузку. Таким образом, из (1.9) следует, что регулирование напряжения U_T с целью поддержания постоянной мощности генератора на фиксированной позиции контроллера машиниста (при $n = \text{const}$) может осуществляться только за счет изменения магнитного потока $\Phi = f(i_B)$ системы возбуждения генератора.

Регулирование напряжения тягового генератора. На тепловозах выпуска 20—30-х гг. XX в. регулирование тока возбуждения производилось машинистом вручную, при помощи специального штурвала.

На тепловозах Д^А и Д^Б, поступивших на железные дороги нашей страны в 1945—46 гг., регулирование возбуждения тягового генератора осуществлялось автоматически по схеме, предложенной Г. Лемпом, за счет специальной конструкции генераторов-возбудителей. В результате значительно повышалась эффективность работы локомотивов и улучшались условия труда машинистов. Затем аналогичные схемы (их принято называть электромашинными системами автоматического регулирования) нашли применение на тепловозах ТЭ1, ТЭ2, ТЭ3, ТЭМ1, ТЭМ2 и ЧМЭЗ.

Кратко остановимся на принципе действия и устройстве такой схемы, использующей генератор-возбудитель с продольным расщеплением полюсов, применительно к тепловозу ТЭМ2 (рис. 1.7).

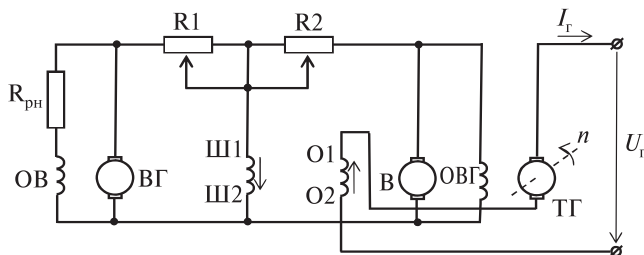


Рис. 1.7. Принципиальная блок-схема электромашинной системы автоматического регулирования напряжения тягового генератора (схема Лемпа)

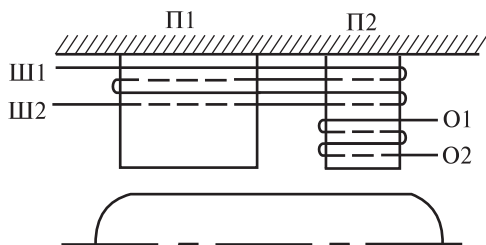


Рис. 1.8. Размещение обмоток на расщепленном полюсе возбудителя: Ш1-Ш2 — обмотка параллельного возбуждения; О1-О2 — дифференциальная обмотка

Конструктивно вспомогательный генератор ВГ и возбудитель В объединены в двухмашинный агрегат, приводимый во вращение от шкива на валу тягового генератора. Следовательно, их ЭДС, так же как и ЭДС тягового генератора, пропорциональна частоте n вращения вала дизель-генератора.

Вспомогательный генератор ВГ представляет собой генератор постоянного тока с параллельным возбуждением.

Возбудитель В имеет четыре полюса. Каждый из них в продольном направлении расчленен на две части (рис. 1.8): ненасыщенную П1 и насыщенную П2. Насыщение второй части полюса достигнуто благодаря меньшему сечению сердечника и вырезам на нем.

На обеих частях полюса смонтирована параллельная обмотка возбуждения Ш1-Ш2, она получает питание как от возбудителя В, так и от вспомогательного генератора ВГ.

На насыщенной части полюса П2 смонтирована дифференциальная обмотка О1-О2, включенная последовательно с якорем тягового генератора, причем ее витки намотаны на сердечник противоположно виткам обмотки Ш1-Ш2. Поэтому магнитодвижущая сила дифференциальной обмотки О1-О2 направлена встречно МДС параллельной обмотки Ш1-Ш2.

ЭДС возбудителя В равна

$$E_B = c_B \Phi_B n_B,$$

где c_B — постоянная величина для данного возбудителя, определяемая числом пар полюсов и параметрами обмотки якоря, В/(Вб·об/мин);

Φ_B — магнитный поток полюсов возбудителя, Вб;

n_B — частота вращения якоря возбудителя, об/мин.

Магнитный поток полюсов возбудителя Φ_B можно представить как алгебраическую сумму магнитных потоков ненасыщенной $\Phi_{П1}$ и насыщенной $\Phi_{П2}$ частей полюсов:

$$\Phi_B = \Phi_{П1} \pm \Phi_{П2}.$$

Тогда ЭДС возбудителя может быть определена согласно выражению

$$E_B = c_B \Phi_{П1} n_B \pm c_B \Phi_{П2} n_B = E_{П1} \pm E_{П2},$$

где $E_{П1}$, $E_{П2}$ — ЭДС возбудителя от ненасыщенной и насыщенной частей полюсов соответственно.

Магнитный поток ненасыщенной части полюсов $\Phi_{П1}$ определяется магнитодвижущей силой (МДС) параллельной обмотки

$$F_{П1} = F_{шв}.$$

Магнитный поток насыщенной части полюсов $\Phi_{П2}$ определяется как разность МДС параллельной и дифференциальной обмоток:

$$F_{П2} = F_{шв} - F_{дв}.$$

На рис. 1.9 представлен характер изменения величин $E_{П1}$, $E_{П2}$ и E_B в зависимости от тока нагрузки I_T тягового генератора.

Как указывалось выше, составляющая ЭДС $E_{П1}$ определяется МДС параллельной обмотки $F_{шв}$. Если бы эта обмотка питалась только от цепи вспомогательного генератора ВГ, то $E_{П1}$ не зависела бы от I_T и сохраняла постоянное значение. Однако, так как параллельная обмотка получает питание и от возбудителя В (см. рис. 1.7), а напряжение возбудителя с увеличением тока I_T падает, магнитный поток $\Phi_{П1}$ и ЭДС $E_{П1}$ с увеличением тока нагрузки тягового генератора будут снижаться (см. линию $E_{П1}$ на рис. 1.9).

Электродвижущая сила $E_{П2}$ определяется взаимодействием МДС параллельной и дифференциальной обмоток. При малых токах нагрузки генератора сердечник части П2 полюсов насы-

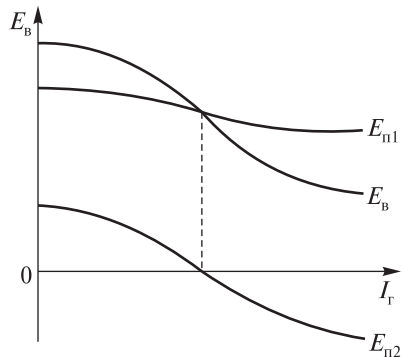


Рис. 1.9. Характеристики возбудителя с продольным расщеплением полюсов: $E_{П1}$ и $E_{П2}$ — ЭДС возбудителя при возбуждении от ненасыщенной и насыщенной частей полюсов; E_B — результирующая ЭДС возбудителя

щен магнитным потоком параллельной обмотки. При увеличении тока нагрузки МДС дифференциальной обмотки увеличивается, а результирующая МДС $F_{\Pi 2}$ и ЭДС $E_{\Pi 2}$ насыщенной части полюсов уменьшаются.

В некоторый момент МДС дифференциальной обмотки превысит МДС параллельной обмотки, сердечник насыщенной части полюсов $\Pi 2$ перемагнитится и ЭДС $E_{\Pi 2}$ изменит свой знак. По мере дальнейшего увеличения тока нагрузки генератора, а следовательно и тока в дифференциальной обмотке, отрицательное значение ЭДС $E_{\Pi 2}$ будет возрастать и наконец наступит насыщение сердечников насыщенных частей полюсов магнитным потоком дифференциальной обмотки. Криволинейная часть характеристики $E_{\Pi 2}$ создается при насыщении сердечников.

Тяговый генератор ТГ имеет независимое возбуждение от обмотки ОВГ, которая питается от возбудителя В.

На рис. 1.10 представлена характеристика возбудителя с продольно-расщепленными полюсами МВТ-25/9 тепловоза ТЭМ2. Характеристика тягового генератора ГП-300Б подобна характеристике возбудителя (рис. 1.11). Обратим внимание на то, что на-

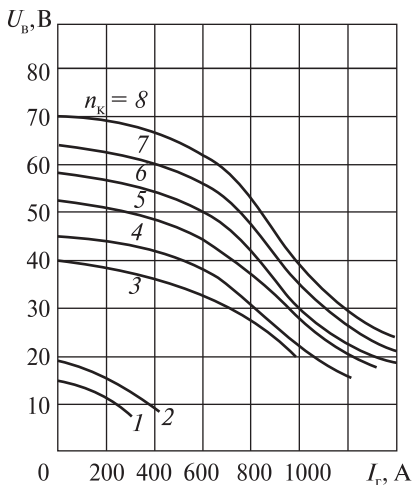


Рис. 1.10. Характеристика возбудителя МВТ-25/9 для различных позиций КМ: 1—8 — номера позиций

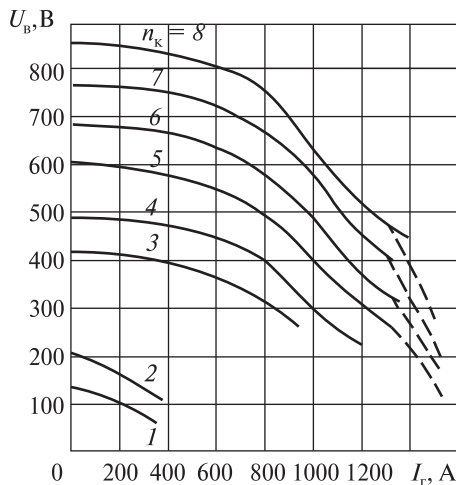


Рис. 1.11. Внешняя характеристика генератора ГП-300Б для различных позиций КМ: 1—8 — номера позиций

пряжение U_B , подаваемое на независимую обмотку возбуждения тягового генератора, измеряется десятками вольт, а напряжение U_T на его клеммах — сотнями вольт, т.е. тяговый генератор работает как усилитель напряжения.

Таким образом, при увеличении тока I_T в силовой цепи напряжение генератора U_T автоматически понижается, а при уменьшении — повышается, что обеспечивает формирование гиперболической внешней характеристики генератора.

Кроме того, автоматически поддерживается постоянное значение электромагнитного момента на валу генератора (момента полезной нагрузки дизеля) при заданной позиции контроллера машиниста:

$$M = C_M \Phi(I_B) I_T, \quad (1.10)$$

что обеспечивает устойчивую работу дизель-генераторной установки.

С точки зрения теории автоматического управления, описанная выше схема Лемпа представляет собой простейшую систему автоматического регулирования (САР) по возмущению (рис. 1.12).

Объектом управления является тяговый генератор, возмущением для него является ток нагрузки I_T , а управляемой величиной — напряжение тягового генератора U_T .

Сигнал по току нагрузки поступает в автоматический регулятор АР, который в данном случае состоит из возбудителя В и вспомогательного генератора ВГ. Заданием для АР являются значения сопротивлений R_1 , R_2 и R_{PH} (см. рис. 1.7). Частота вращения n вала

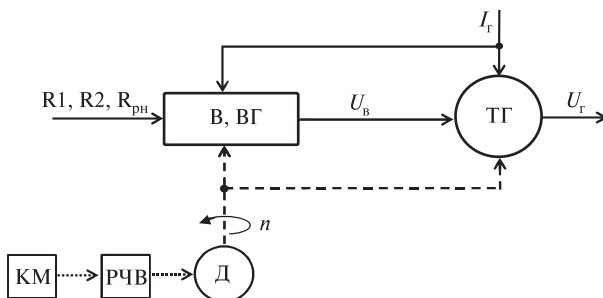


Рис. 1.12. Функциональная схема системы автоматического регулирования напряжения тягового генератора по возмущению

дизель-генератора определяется набранной позицией контроллера машиниста, при фиксированной позиции КМ она постоянна. Напряжение U_B , подаваемое на обмотку возбуждения тягового генератора, является управляющим воздействием.

Такая система управления является разомкнутой; в ней отсутствует обратная связь по управляемой величине. Существенным органическим недостатком такой системы является низкая точность и плохое качество работы.

Для тепловозов 2ТЭ10, ТЭП60, М62 были разработаны аппаратные системы регулирования напряжения, содержащие в качестве возбудителей электрические машины обычной конструкции, не имеющие расщепленных полюсов и нескольких обмоток возбуждения, а в качестве датчиков, сумматоров и усилителей — бесконтактные электрические аппараты (магнитные и полупроводниковые усилители, выпрямители, преобразователи и др.). Эти системы — системы комбинированного регулирования, так как они построены на основе принципов регулирования по отклонению управляемой величины (принцип отрицательной обратной связи) и по возмущениям (току генератора, частоте вращения вала дизеля и положению органа топливоподачи дизеля).

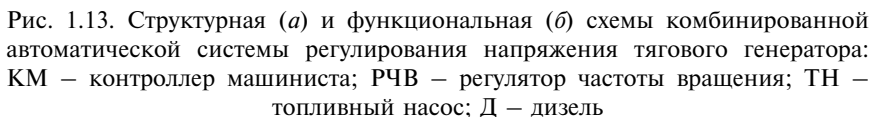
Структурная схема комбинированной автоматической системы регулирования напряжения тягового генератора U_r показана на рис. 1.13, а, ее функциональная схема — на рис. 1.13, б.

В качестве сигналов по возмущениям тягового генератора ТГ используются ток, частота вращения и положение органа топливоподачи дизеля. Для измерения текущих значений и формирования сигналов используются измерительные устройства (ИУ):

- датчик напряжения ДН формирует сигнал i_1 по напряжению генератора;
- датчик тока ДТ формирует сигнал i_2 по току генератора;
- датчик частоты вращения ДЧВ формирует сигнал i_3 по частоте вращения вала дизель-генератора;
- индуктивный датчик перемещения реек топливных насосов ДП формирует сигнал i_4 по подаче топлива.

Полученные сигналы подаются на сумматор С (амплистат возбуждения АВ).

На выходе сумматора формируется напряжение возбуждения возбудителя U_{BB} , которое подается на возбудитель В, выполняю-



ций функции органа регулирования. Возбудитель имеет две обмотки, причем одна из них (НВ) подключена к сумматору, а другая (РВ) — к вспомогательному генератору. Магнитодвижущие силы этих обмоток направлены встречно, т.е. для формирования гиперболической характеристики здесь применен тот же принцип, что и в схеме Лемпа.

Для повышения устойчивости и улучшения качества работы используется устройство местных обратных связей (УОС). Датчик скорости изменения тока возбуждения генератора ДС выполняет

функции устройства обратной отрицательной гибкой связи выхода возбудителя со входом амплистата АВ.

Для настройки регуляторов применены переменные сопротивления, играющие роль задающих устройств (на схеме не показаны).

Напряжение $U_{\text{в}}$, подаваемое от возбудителя на обмотку возбуждения ТГ, является управляющим воздействием.

Описанные выше системы управления первых поколений (электромашинные и аппаратные) в настоящее время морально и физически устарели. Они заменяются микропроцессорными системами управления, например на тепловозах 2ТЭ10 и М62 при ремонте может быть установлена унифицированная система управления электропередачей (УСТА). С помощью цифровых программируемых автоматических систем можно реализовать значительно более сложные и эффективные алгоритмы работы электропередачи, чем на аналоговых регуляторах. Такие алгоритмы позволяют продлить срок службы локомотивов, уже находящихся в эксплуатации, и обеспечить более высокие качественные показатели их работы.

Регулирование частоты вращения ТЭД. Переключение схемы соединения ТЭД на тепловозах не применяется (за исключением ТЭ1, где ТЭД могли подключаться либо последовательно, либо последовательно-параллельно — двумя группами по три двигателя).

На магистральных грузовых и пассажирских тепловозах ТЭД всегда подключены параллельно (см. рис. 1.6). На маневровых тепловозах с электропередачей ТЭД соединены группами — либо по два, либо по три двигателя.

Следовательно, напряжение, подаваемое на тяговый двигатель, либо равно напряжению генератора $U_{\text{г}}$ (при параллельном соединении ТЭД), либо ему пропорционально (при последовательно-параллельном соединении). Частота вращения вала двигателя, согласно (1.6), определяется величиной этого напряжения.

На практике для дополнительного регулирования частоты вращения вала двигателя используется ослабление поля возбуждения. Как правило, тепловозные ТЭД имеют две ступени ослабления поля. Например, у 2ТЭ10 $\alpha_1 = 0,60$; $\alpha_2 = 0,36$; у ТЭП60 $\alpha_1 = 0,60$; $\alpha_2 = 0,40$. В результате при возрастании скорости движения тепловоза от нуля до максимального значения, гиперболическая часть характеристики повторяется 3 раза.

В настоящее время выпускаются маневровые тепловозы ТЭМ18ДМ с ЭПМ постоянного тока, состоящей из тягового генератора, шести тяговых двигателей, сглаживающего реактора (дресселя), электронного контроллера и контакторной аппаратуры. Схема предусматривает постоянную последовательно-параллельную группировку ТЭД (две параллельные группы по три двигателя в каждой) и две ступени ослабления поля.

Тепловоз оборудован микропроцессорной системой управления и диагностики МПСУ с выводом информации на дисплей пульты машиниста.

1.3.3. Электровозы переменного тока с коллекторными ТЭД пульсирующего тока

Массовая электрификация железных дорог нашей страны на переменном токе (напряжение $U_{\text{кв}} = 25 \text{ кВ}$, частота $f = 50 \text{ Гц}$) и применение электровозов переменного тока стали возможными после освоения производства выпрямителей: сначала на базе ртутных вентилей (игнитроны), а затем, в 60-х гг. XX в., на базе полупроводниковых кремниевых диодов.

Первое поколение электровозов переменного тока. Принципиальная блок-схема силовых цепей электровозов переменного тока с неуправляемой выпрямительной установкой (ВЛ60^к, ВЛ80 всех модификаций, кроме ВЛ80^р, а также ЧС4, ЧС4^т, ЧС8) показана на рис. 1.14.

От токоприемника напряжение контактной сети $U_{\text{кв}}$ подается на сетевую (первичную) обмотку понижающего тягового трансформатора ТР. Напряжение регулируется на первичной (электровозы ЧС) или на вторичной (электровозы ВЛ) обмотке, что требует большого числа выводов. Далее рассматривается только конструкция, принятая на электровозах ВЛ.

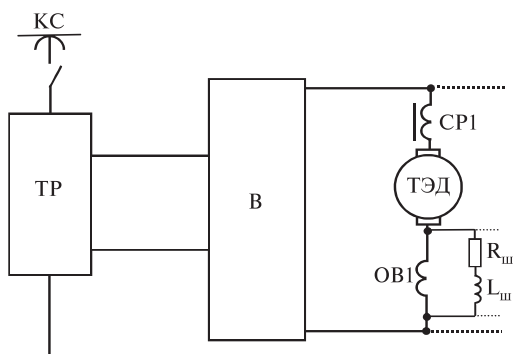


Рис. 1.14. Принципиальная блок-схема силовых цепей электровоза переменного тока с неуправляемой выпрямительной установкой

Напряжение с выводов вторичной обмотки подается на выпрямительную установку В, а затем на тяговые двигатели последовательного возбуждения.

Диодная выпрямительная установка выполнена по мостовой схеме (рис. 1.15) и состоит из четырех плеч VD1—VD4, подключенных к вторичной обмотке трансформатора.

В течение одного полупериода при направлении ЭДС, показанном на рис. 1.15 стрелкой, ток проходит от одного вывода вторичной обмотки трансформатора через вентиль VD1, нагрузку и вентиль VD4 к другому выводу. В течение второго полупериода (при противоположном направлении ЭДС) ток проходит от второго вывода трансформатора через вентиль VD3, нагрузку и вентиль VD2 к первому выводу. В обоих случаях через нагрузку ток i_d проходит в одном направлении.

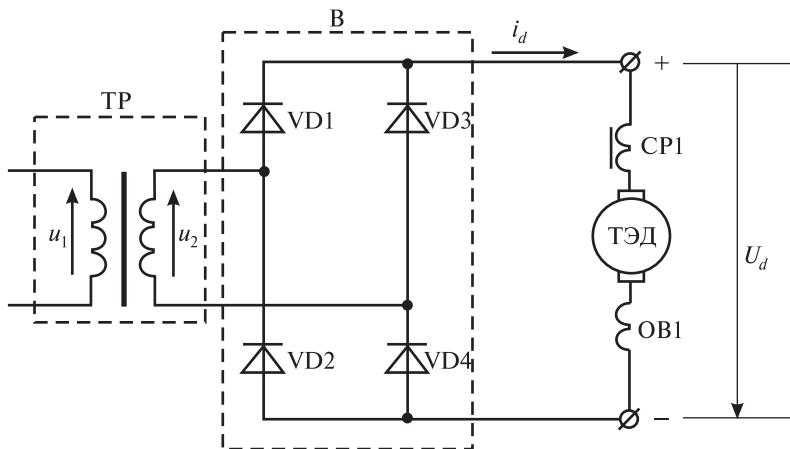


Рис. 1.15. Схема однофазной мостовой выпрямительной установки

Диаграммы напряжения U_2 на вторичной обмотке трансформатора и выпрямленного напряжения U_d показаны на рис. 1.16, а, б.

Выпрямленное напряжение U_d при разложении в ряд Фурье содержит постоянную составляющую, равную среднему значению, и переменную составляющую, которая представляет собой сумму высших гармонических составляющих.

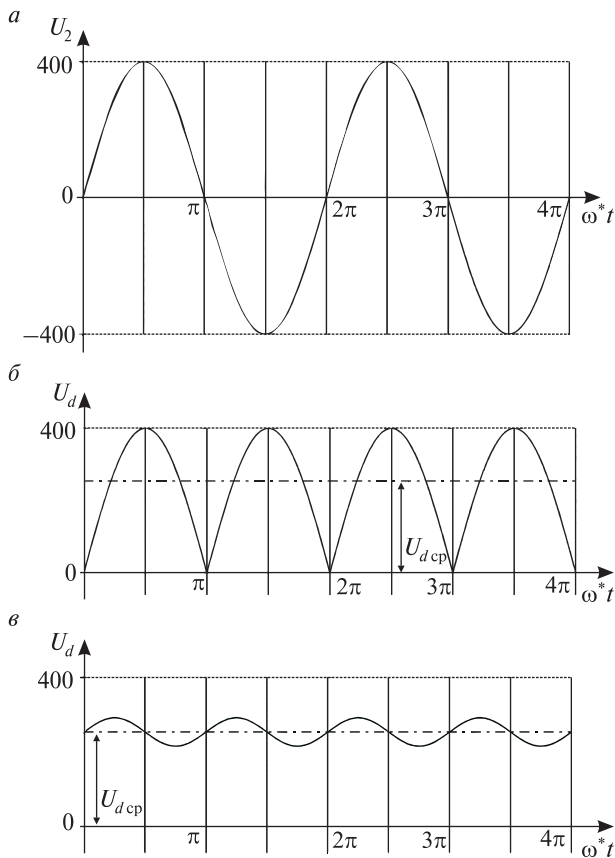


Рис. 1.16. Диаграммы напряжения на вторичной обмотке трансформатора (а), выпрямленного напряжения (б) и напряжения, подаваемого на ТЭД после сглаживающего реактора (в)

Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{d\text{сред}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{M2} \sin \varphi d\varphi = \frac{U_{M2}}{\pi} (-\cos \varphi) \Big|_0^{\pi} =$$

$$= \frac{2}{\pi} U_{M2} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0,9 U_2;$$

где U_{M2} — амплитудное значение напряжения вторичной обмотки трансформатора;

U_2 — эффективное значение этого напряжения;
 $\varphi = \omega^* t$; $\omega^* = 2\pi f$.

Синусная составляющая ряда отсутствует, так как U_d — четная функция, а косинусная составляющая имеет только четные гармоники. Амплитуды гармонических составляющих порядков $n = 2, 4, 6, \dots$ таковы:

$$a_{(n)} = \frac{2}{n^2 - 1} U_{d \text{ сред}}.$$

Численные значения, характеризующие интенсивность гармоник переменной составляющей выпрямленного напряжения при частоте питающей сети $f = 50$ Гц, приведены ниже.

n	2	4	6	8
$f_n = n f$, Гц	100	200	300	400
$a_{(n)} / U_{d \text{ сред}}$	0,66	0,134	0,06	0,032

Отсюда следует, что в кривой выпрямленного напряжения ярко выражена вторая ($n = 2$) гармоническая составляющая с частотой $f_2 = 100$ Гц, амплитуда которой достигает 66 % постоянной составляющей. Доля других высших гармоник незначительна.

Качество выпрямленного напряжения оценивается коэффициентом пульсации, представляющим собой отношение амплитуды переменной составляющей (которая может быть приближенно принята равной амплитуде старшей гармоники) к среднему значению выпрямленного напряжения:

$$k_q \approx \frac{a_{(2)}}{U_{d \text{ сред}}} = 0,66.$$

Отсюда ясно, что качество выпрямленного напряжения невысокое. Для сглаживания пульсаций выпрямленного тока применяются сглаживающие реакторы СР (см. рис. 1.14). График напряжения, подаваемого на ТЭД после сглаживающего реактора, показан на рис. 1.16, в. Однако, если подать такое пульсирующее напряжение на тяговый двигатель, применяющийся на электро-возах постоянного тока, это приведет к его перегреву вследствие ухудшения условий коммутации.

Поэтому были разработаны коллекторные ТЭД пульсирующего тока, специальные конструктивные меры позволили приспособить

эти двигатели к нормальной работе в условиях наличия гармоник 100 Гц в питающем напряжении. Характеристики ТЭД пульсирующего тока приведены в табл. 1.4.

На электровозах переменного тока ТЭД всегда подключены параллельно, перегруппировка двигателей и пусковые реостаты не применяются.

Скорость движения регулируется изменением напряжения, подводимого к ТЭД, что достигается на электровозах ВЛ переключением под нагрузкой секций тяговой обмотки трансформатора и встречным или согласованным соединением нерегулируемых и регулируемых секций этой обмотки (так называемое зонное регулирование). Переключения выполняются главным контроллером при помощи кулачковых валов и контакторов.

Применяется ослабление поля возбуждения ТЭД: три ступени на электровозах ВЛ (0,70; 0,52; 0,43) и пять ступеней на электровозах ЧС (0,72; 0,60; 0,51; 0,44; 0,40).

Второе поколение электровозов переменного тока. Существенным недостатком электровозов первого поколения являются ступенчатое изменение напряжения на ТЭД и невозможность реализации режима рекуперативного торможения.

Эти недостатки удалось устранить за счет применения управляемого преобразователя на тиристорах, который позволил реализовать в режиме тяги плавное регулирование напряжения путем изменения угла отпирания тиристорov (зонно-фазное регулирование).

Преобразовательная установка получила название выпрямительно-инверторного преобразователя ВИП, она применяется на грузовых (ВЛ80Р, ВЛ85 и семейства «Ермак») и пассажирских (ВЛ65, ЭП1 и его модификациях) электровозах. Принципиальная блок-схема силовых цепей этих электровозов показана на рис. 1.17.

ВИП подключается к вторичной обмотке ТР, состоящей из трех секций (рис. 1.18). Каждый ВИП питает два тяговых электродвигателя, в цепи которых установлены сглаживающие реакторы. Для управления ВИП используется блок управления (БУ) ВИП. Система импульсно-фазового управления преобразует команды, поступающие с контроллера машиниста, в импульсы управления тиристорами согласно алгоритму работы.

Силовая часть ВИП содержит восемь плеч. На электровозах семейства «Ермак» плечи укомплектованы тиристорами Т353-800.

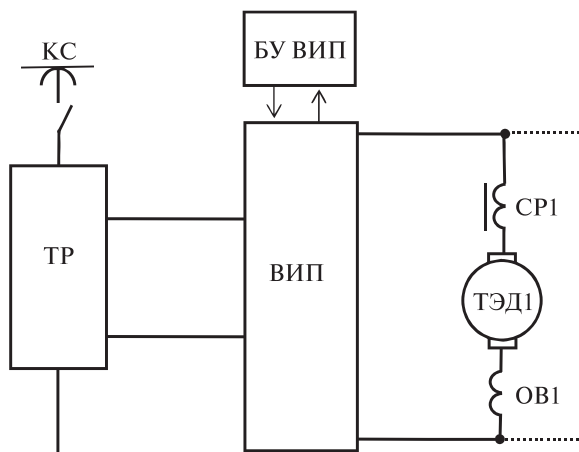


Рис. 1.17. Принципиальная блок-схема силовых цепей электровоза переменного тока с выпрямительно-инверторным преобразователем

Первое, второе, седьмое и восьмое плечо укомплектованы тиристорами 28-го класса с неповторяющимся импульсным напряжением в закрытом состоянии не менее 3600 В; третье, четвертое, пятое и шестое плечо — 28-го класса с неповторяющимся импульсным напряжением в закрытом состоянии не менее 3100 В.

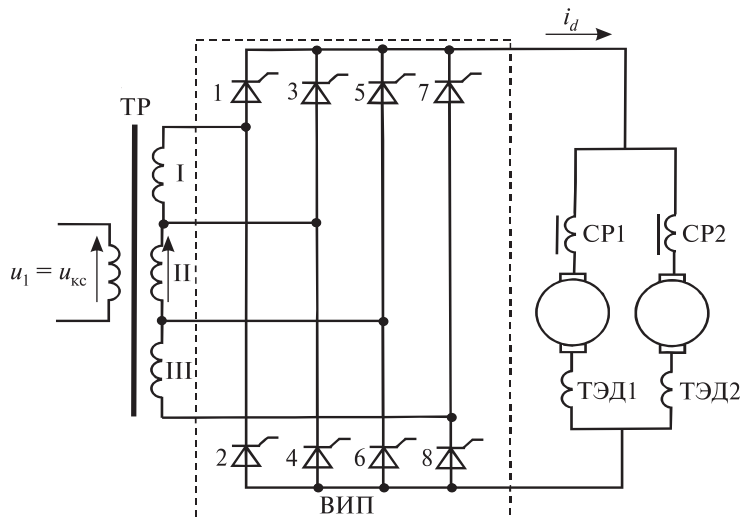


Рис. 1.18. Функциональная схема ВИП: I, II, III — секции вторичной обмотки трансформатора; 1—8 — плечи; СР1, СР2 — сглаживающие реакторы; ТЭД1, ТЭД2 — тяговые двигатели

ВИП позволяет реализовать четыре зоны регулирования выпрямленного напряжения при трех секциях вторичной обмотки трансформатора (табл. 1.7).

Таблица 1.7

Зоны регулирования напряжения ВИП

Зоны регулирования	Номера секций трансформатора	Номера плеч
№ 1 0—350 В	II	$\uparrow(3o, 6p); \downarrow(5o, 4p)$
№ 2 350—700 В	I + II	$\uparrow(1p, 3z, 6o); \downarrow(5o, 2p, 4z)$
№ 3 700—1050 В	II + III	$\uparrow(3p, 5z, 8o); \downarrow(7o, 4p, 6z)$
№ 4 1050—1400 В	I + II + III	$\uparrow(1p, 3z, 8o); \downarrow(7o, 2p, 4z)$

Примечание. Буквами обозначены режимы работы тиристоров: «р» — регулируемый, «о» — открытый, «з» — открытый с задержкой).

Напряжение на секциях I и II составляет 350 В, на секции III — 700 В. Ниже приведен пример плавного увеличения напряжения на ТЭД в режиме тяги от 0 до 1400 В.

Регулирование начинается в 1-й зоне, питание осуществляется от секции II. При направлении ЭДС, показанном стрелкой на рис. 1.18, ток идет через плечо 3 (тиристоры которого полностью открыты) и через нагрузку, и затем через регулируемые тиристоры плеча 6 возвращается на секцию II. При противоположном направлении ЭДС ток проходит через открытое плечо 5 и через нагрузку, а затем возвращается через регулируемые тиристоры плеча 4. Угол отпирания регулируемых тиристоров плавно изменяется от $\alpha_{p \max} = 180^\circ - \alpha_0$ до $\alpha_{p \min} = \alpha_0$, при этом напряжение на нагрузке возрастает от 0 до 350 В.

Затем осуществляется переход на 2-ю зону, питание осуществляется от секций I и II. При направлении ЭДС, показанном стрелкой, ток идет на нагрузку через регулируемое плечо 1 и от вывода между I и II секциями через плечо 3 (открытое с задержкой по фазе $\alpha_{0z} = \alpha_0 + \gamma_0'$), а возвращается через открытое плечо 6. При обратном направлении ЭДС ток проходит через открытое плечо 5 и через нагрузку, а затем возвращается через регулируемое плечо 2 и через плечо 4, имеющее задержку по фазе. Напряжение на нагрузке повышается от 350 до 700 В.

В 3-й зоне регулирования питание осуществляется от секций II и III. При направлении ЭДС, показанном стрелкой, ток идет

на нагрузку через регулируемое плечо 3 и от вывода между II и III секциями через плечо 5 (открытое с задержкой по фазе α_{03}), а возвращается через открытое плечо 8. При обратном направлении ЭДС ток проходит через открытое плечо 7 и через нагрузку, а затем возвращается через регулируемое плечо 4 и через плечо 6, имеющее задержку по фазе. Напряжение на нагрузке повышается от 700 до 1050 В.

В 4-й зоне регулирования питание осуществляется от всех трех секций. При направлении ЭДС, показанном стрелкой, ток идет на нагрузку через регулируемое плечо 1 и от отпайки между I и II секциями через плечо 3 (открытое с задержкой по фазе α_{03}), а возвращается через открытое плечо 8. При обратном направлении ЭДС ток проходит через открытое плечо 7, через нагрузку и затем возвращается через регулируемое плечо 2 и через плечо 4, имеющее задержку по фазе. Напряжение на нагрузке повышается от 1050 до 1400 В.

На рис. 1.19 показано изменение напряжения на ТЭД в зависимости от угла отпирания тиристоров α_p по зонам регулирования.

В режиме рекуперации ВИП работает как ведомый сетью инвертор: он преобразует постоянное напряжение на выводах ТЭД, работающих в генераторном режиме, в однофазное переменное напряжение частоты 50 Гц, которое затем повышается трансформатором ТР и отдается обратно в контактную сеть.

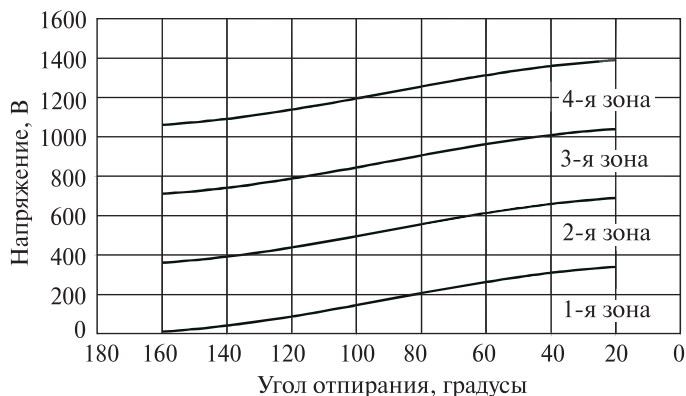


Рис. 1.19. Изменение напряжения на ТЭД в зависимости от угла отпирания тиристоров α_p по зонам

Выпускаемые в настоящее время электровозы (семейство «Ермак», ЭП1) оснащены многоуровневыми микропроцессорными системами управления.

1.3.4. Тепловозы с электропередачей переменного-постоянного тока

Выпуск тепловозов, оснащенных ЭПМ переменного-постоянного тока, был начат в конце 60-х гг. XX в. практически одновременно с электровозами переменного тока. ЭПМ переменного-постоянного тока имеет в своем составе синхронный тяговый генератор СТГ, выпрямительную установку ВУ и коллекторные ТЭД постоянного тока последовательного возбуждения (рис. 1.20). Такой передачей оснащены грузовые тепловозы 2ТЭ116 и 2ТЭ25к «Пересвет», пассажирский ТЭП70, маневровый ТЭМ7 и др. Тепловозы 2ТЭ25к «Пересвет» и 2ТЭ116У имеют систему поосного регулирования силы тяги и индивидуальное (каждый от своего управляемого выпрямителя) питание ТЭД.

В приемлемых для тепловоза габаритах синхронный тяговый генератор может быть выполнен мощностью более 7000 кВт.

Основные преимущества синхронного генератора перед генератором постоянного тока заключаются в:

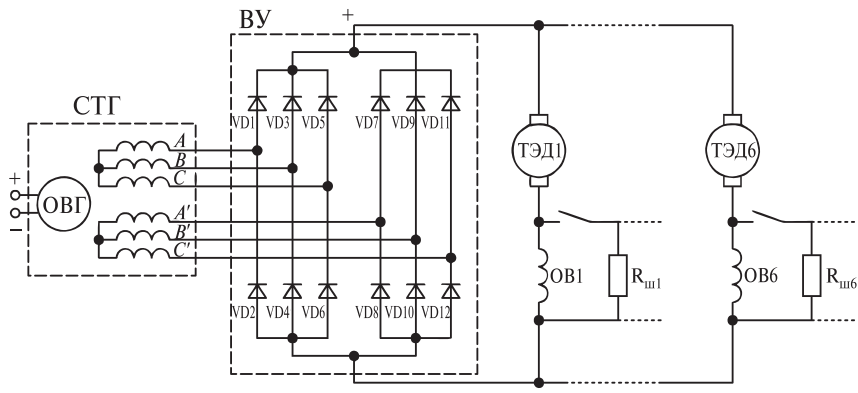


Рис. 1.20. Принципиальная схема ЭПМ переменного-постоянного тока: СТГ — синхронный тяговый генератор; ОВГ — обмотка возбуждения генератора; ВУ — выпрямительная установка; ТЭД — тяговый электродвигатель; ОБ — обмотка возбуждения; $R_{ш}$ — резисторы

— отсутствии коллекторно-щеточного узла, что повышает надежность генератора и тем самым позволяет существенно уменьшить эксплуатационные расходы;

— отсутствии ограничения по частоте вращения ротора;

— снижении массы на единицу мощности в 2 раза;

— уменьшении расхода меди и электротехнической стали.

Необходимость применения выпрямительной установки несколько снижает преимущества синхронного генератора. Кроме того, в ЭПМ переменного-постоянного тока применяются коллекторные ТЭД постоянного тока, параметры которых, так же как и в ЭПМ постоянного тока, приближаются к предельным по использованию электромагнитных свойств материалов и коммутации.

Технические характеристики электрических машин и выпрямительной установки, применяемых в ЭПМ переменного-постоянного тока, приведены в табл. 1.8—1.10.

Таблица 1.8

Технические характеристики синхронных тяговых генераторов тепловозов с ЭПМ переменного-постоянного тока

Тип тягового генератора (агрегата)	Серия тепловоза	Мощность активная, кВт	Напряжение линейное, В (максимальное/номинальное)	Действующее значение линейного тока, А	Номинальная частота вращения, об/мин	Масса, кг	Удельная масса, кг/кВт
Генератор ГС-501А У2	ТЭП70	2750	<u>580</u> 405	<u>2×1500</u> 2×2150	1000	6000	2,14
То же, ГС-501А У2	2ТЭ116	2190	<u>535</u> 290	<u>2×1330</u> 2×2350	1000	6000	2,74
То же, ГС-501А Т2	ТЭ114 (экспорт)	1850	<u>535</u> 345	<u>2×1100</u> 2×1700	1000	6000	3,24
Генераторы ГС-515 У2 (ГСТ 1400-1000 У2)	ТЭМ7(А)	1400	280 175	2×1540 2×2500	1000	5200	3,71
Агрегат АСТ 2800/400-1000 У2	2ТЭ25к	2300	<u>580</u> 330	<u>2×1150</u> 2×2070	1000	7300*	2,70*

Примечания. 1. Возбуждение — независимое для всех типов генераторов.

2. Линейное напряжение равно фазному, умноженному на $\sqrt{3}$.

3. Звездочкой (*) отмечены показатели тягового агрегата (общая масса и суммарная мощность тягового и вспомогательного генераторов).

Таблица 1.9

**Технические характеристики тяговых двигателей тепловозов
с ЭПМ переменного-постоянного тока**

Тип тягового двигателя	Серия тепловоза	Мощность, кВт	Ток длительного режима, А	Напряжение длитель- ного режима, В	Частота вращения, об/мин		Масса, кг	Удельная масса, кг/кВт
					Длительная	Максимальная		
ЭД121А	ТЭП70	413	830	542	704	2320	2950	7,2
ЭД118А(Б)	2ТЭ116	305	750	449	585	2290	3100	10,2
ЭДУ-133Ц	2ТЭ25к	340	890	415	493	2320	3100	9,1
ЭД120А	ТЭМ7	135	800	205	245	1890	3000	22,2

Таблица 1.10

Техническая характеристика выпрямительной установки УВКТ-5

Номинальная мощность, кВт	4200
Номинальный выпрямленный ток, А	5700
Номинальное выпрямленное напряжение, В, не более	750
Частота питающей сети, Гц	30—133
Напряжение питающего генератора, В	575/350
Охлаждение	Воздушное, принудительное
Количество вентиля	240
Тип вентиля	ВЛ-200-8
Масса, кг	650

Синхронный тяговый генератор. В отличие от генератора постоянного тока, магнитное поле которого создается полюсами, размещенными на статоре, и располагается в пространстве неподвижно, магнитное поле синхронного генератора вращается вместе с ротором. Регулируемое напряжение возбуждения подводится к полюсам, находящимся на роторе, через контактные кольца.

Синхронный генератор имеет две статорные трехфазные обмотки, соединенные по схеме «звезда».

Частота тока f , Гц, и частота вращения ротора n , об/мин, находятся в строго постоянном соотношении

$$f = \frac{pn}{60}, \quad (1.11)$$

где p — число пар полюсов.

Подчеркнем, что частота вырабатываемого тока f меняется в зависимости от числа оборотов вала дизель-генератора. Например, для явнополюсного генератора с 12 полюсами на роторе (т.е. $p = 6$) при $n = 500$ об/мин получаем $f = 50$ Гц, при $n = 1000$ об/мин имеем $f = 100$ Гц.

ЭДС одной фазы синхронного генератора может быть представлена как

$$E = C_e \Phi(i_B) n, \quad (1.12)$$

где $\Phi(i_B)$ — магнитный поток системы возбуждения, Вб;

C_e — конструкционная постоянная, в данном случае

$$C_e = 4,44 w k_{об} k_c \frac{p}{60},$$

где w — число витков фазы (число последовательно соединенных витков каждой параллельной ветви);

$k_{об}$ — обмоточный коэффициент;

k_c — коэффициент скоса пазов обмотки.

Свободной мощности дизеля соответствует активная составляющая мощности синхронного генератора с двумя параллельными трехфазными обмотками:

$$P_r = 2 \cdot 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \varphi, \quad (1.13)$$

где U_ϕ , I_ϕ — действующие значения фазных напряжения и тока;

$\cos \varphi$ — коэффициент мощности: для номинального режима $\cos \varphi = 0,9$; при максимальном напряжении $\cos \varphi = 0,96$; при минимальном напряжении $\cos \varphi = 0,79$.

Напомним, что при соединении в «звезду» действующее значение линейного (междуфазного) напряжения в $\sqrt{3}$ больше действующего значения фазного напряжения, а линейный ток равен фазовому току.

Пренебрегая падением напряжения во внутренних цепях, получим электромагнитный момент синхронного генератора (момент полезной нагрузки дизеля) в виде:

$$M = 2 \cdot 3 \cdot \frac{U_\phi I_\phi}{\omega} \cos \varphi = 2 \cdot 3 \cdot C_m \Phi(i_B) I_\phi \cos \varphi, \quad (1.14)$$

где $\omega = 2\pi n/60$; $C_m = \frac{60}{2\pi} C_e = 4,44 w k_{об} k_c \frac{p}{2\pi}$.

Выпрямительная установка. Принципы построения и режимы работы трехфазных выпрямителей аналогичны неуправляемым однофазным выпрямителям, рассмотренным в п. 1.3.3. Особенностью трехфазных выпрямителей является значительно меньшая переменная составляющая выпрямленного напряжения, кроме того, допущение о полностью сглаженном токе более близко к реальным режимам работы.

Как видно из рис. 1.20, каждая статорная обмотка синхронного генератора включена на свой трехфазный выпрямительный мост выпрямительной установки ВУ.

Выпрямитель, построенный по мостовой схеме, предложен А.Н. Ларионовым (рис. 1.21). Он питается от трехфазной обмотки, фазы *A*, *B*, *C* которой соединены в «звезду», и состоит из двух групп диодов: анодной и катодной, каждая из которых в свою очередь имеет по три диода. Ток одновременно проводят два диода: один в анодной группе, потенциал катода которого минимален, другой в катодной группе, потенциал анода которого максимален относительно нулевой точки обмотки источника напряжения. В результате на выходе формируется выпрямленное напряжение U_d , мгновенные значения которого равны на соответствующих интервалах линейным напряжениям U_{ab} , U_{bc} , U_{ac} , U_{ba} и т.д.

На рис. 1.22, *a*, показаны напряжения фаз *A*, *B*, *C*, на рис. 1.22, *б*, — кривая выпрямленного напряжения U_d ; она имеет шесть пульсаций за один период питающего напряжения, откуда и происходит термин «шестипульсовая схема».

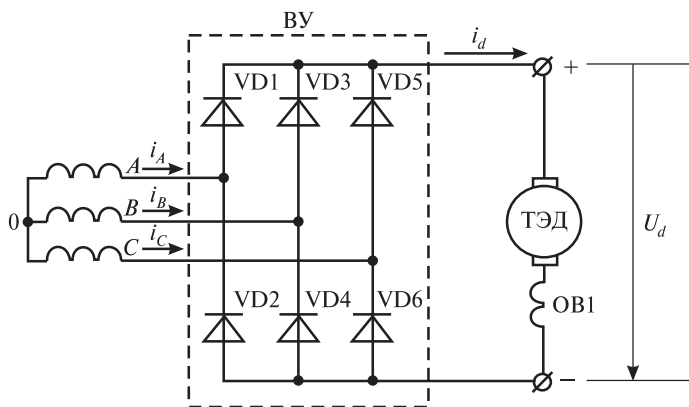


Рис. 1.21. Схема мостового выпрямителя трехфазного тока

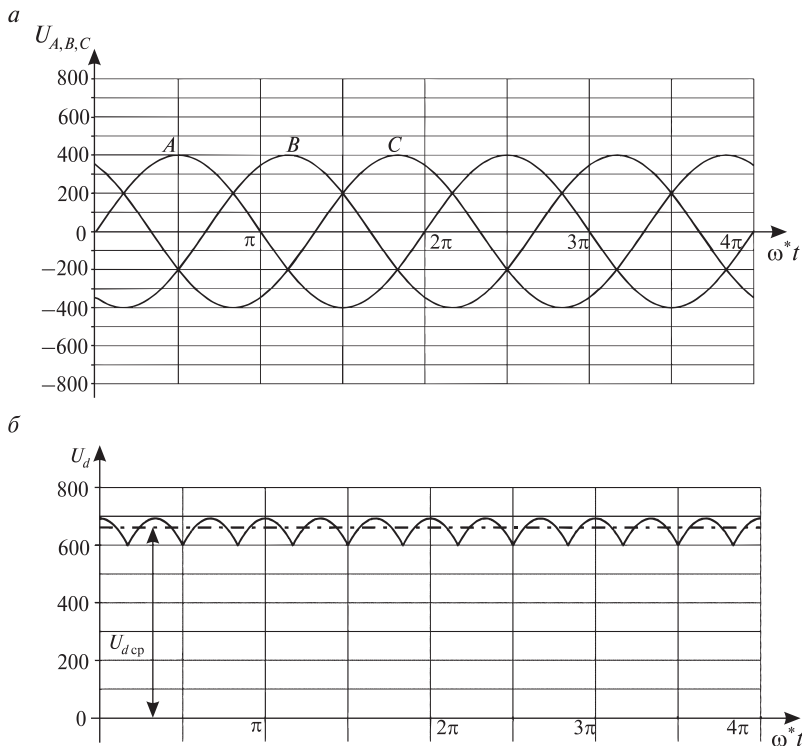


Рис. 1.22. Диаграммы работы трехфазного мостового выпрямителя: кривые напряжений фаз (а) и выпрямленного напряжения (б)

Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{d\text{сред}} = \frac{1}{\pi/3} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} U_{\text{МЛ}} \cos \varphi d\varphi = \frac{3}{\pi} U_{\text{МЛ}} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} U_{\text{Л}} \approx 1,35 U_{\text{Л}}, \quad (1.15)$$

где $U_{\text{МЛ}}$, $U_{\text{Л}}$ — соответственно амплитудное и действующие значения линейного напряжения.

Например, для диаграммы рис. 1.22 амплитудное значение фазового напряжения $U_A = U_B = U_C = 400$ В, действующее значение фазового напряжения равно $400 / \sqrt{2} = 282,8$ В. Действующее значение линейного напряжения $U_{\text{Л}} = 282,8 \sqrt{3} = 489,9$ В. Тогда среднее значение выпрямленного напряжения, согласно (1.15), равно $U_{d\text{сред}} = 1,35 U_{\text{Л}} = 661,4$ В.

Качество выпрямленного напряжения в такой схеме высокое. Коэффициент пульсаций $k_q = 0,057$ (напомним, что для выпрямителя однофазного тока, установленного на электровозах, $k_q = 0,66$).

Двенадцатипульсовые схемы выпрямления используются для дальнейшего уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения и снижения высших гармонических составляющих; они строятся на основе параллельного соединения двух трехфазных выпрямителей (см. рис. 1.20) и широко применяются на тепловозах с ЭПМ переменного-постоянного тока. Такая схема используется в выпрямительной установке УВКТ-5 (см. табл. 1.10).

Значение коэффициента пульсаций k_q при использовании двенадцатипульсовой схемы уменьшается до 0,03. Как следствие, применение дополнительных устройств (типа сглаживающих реакторов на электровозах) не требуется, нет необходимости и в разработке тяговых двигателей специальной конструкции.

Средние значения выпрямленного напряжения одинаковы и равны общему выпрямленному напряжению $U_{d1} = U_{d2} = U_d$. Общий ток нагрузки I_m распределяется поровну между обеими трехфазными обмотками.

Система управления. Управление ЭПМ переменного-постоянного тока осуществляется изменением частоты вращения вала дизель-генератора по позициям контроллера машиниста и регулированием магнитного потока генератора в пределах каждой позиции, что обеспечивает постоянство мощности $U_d I_d = \text{const}$.

ЭПМ переменного-постоянного тока оборудуется автоматической системой регулирования напряжения U_d , которая построена на принципах регулирования по отклонению напряжения генератора и по возмущениям (силе тока и положению органов топливоподачи дизеля). Структурная схема системы показана на рис. 1.23. Принцип работы системы аналогичен рассмотренному в п. 1.3.2.

Регулирование частоты вращения ТЭД. В режиме тяги все ТЭД соединены параллельно и получают питание от выпрямительной установки. Поэтому напряжение на зажимах ТЭД равно U_d , а сила тока в якорной цепи равна I_d , деленному на число двигателей.

Для расширения диапазона скоростей движения применяется, так же как и на тепловозах с ЭПМ постоянного тока, ступенчатое ослабление поля путем шунтирования обмотки возбуждения ТЭД. Как правило, используются две ступени ослабления поля.

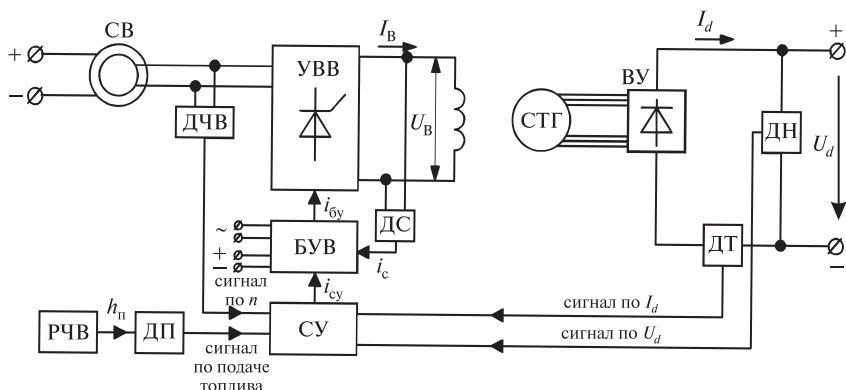


Рис. 1.23. Структурная схема комбинированной автоматической системы регулирования напряжения: СТГ — синхронный тяговый генератор; ВУ — выпрямительная установка; ДТ и ДН — датчики тока и напряжения; СУ — селективный узел; БУВ — блок управления возбуждением; УВВ — управляемый выпрямитель возбуждения; СВ — синхронный возбудитель; РЧВ — регулятор частоты вращения; ДП — индуктивный датчик положения; ДЧВ — датчик частоты вращения; ДС — датчик скорости изменения тока возбуждения

1.4. Применение асинхронного тягового привода на перспективном тяговом подвижном составе

1.4.1. Электровозы с асинхронным тяговым приводом

Применение асинхронных тяговых двигателей (АТД) открывает новые возможности в конкурентной борьбе железных дорог с другими видами транспорта.

Назовем основные достоинства асинхронного тягового привода (АТП):

- из-за большой жесткости характеристик АТД более полно (на 8—10 %), практически на пределе по сцеплению, может быть реализовано развиваемое тяговым двигателем усилие;
- номинальная мощность АТД может быть использована во всем диапазоне скоростей вплоть до конструкционной, вследствие чего локомотив становится универсальным. Опыт показывает, что за счет этого локомотивный парк может быть уменьшен на 10 %;
- мощность АТД в тех же габаритах по сравнению с двигателем постоянного тока может быть увеличена в 1,5—2,0 раза (из-за отсутствия коллекторно-щеточного узла);

– конструкция АТД и привод с его использованием требует меньше дорогостоящих и экологически вредных материалов. Например, меди в 2,0—2,5 раза, изоляционных материалов на 20—25 %, асбеста и асбестосодержащих материалов на 25—30 %;

– существенно снижается трудоемкость обслуживания и ремонта из-за отсутствия коллекторно-щеточного узла и изолированной обмотки на роторе.

Создание электровозов и тепловозов с АТП стало реальной задачей после освоения выпуска быстродействующих полупроводниковых приборов большой единичной мощности и высокопроизводительных микропроцессоров.

На рис. 1.24 показаны возможные варианты силовых схем статических преобразователей электрической энергии магистральных электровозов с АТП.

Из возможных вариантов силовых схем статических преобразователей частоты и числа фаз для магистральных электровозов переменного тока в настоящее время практически всегда применяется схема с входным 4q-S-преобразователем и автономным инвертором напряжения (АИН), а для электровозов постоянного

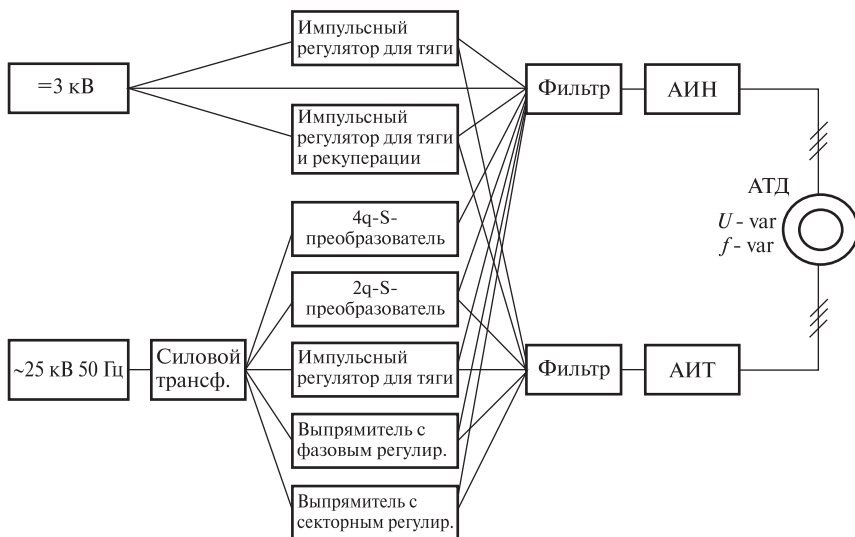
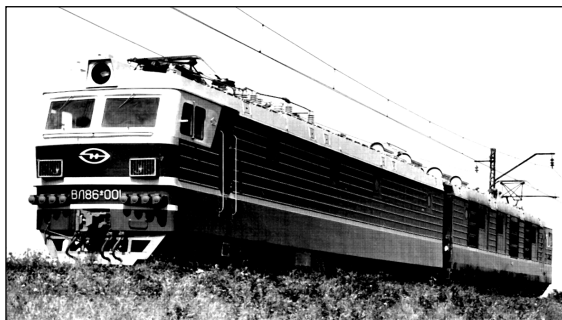


Рис. 1.24. Варианты структурных схем преобразователей частоты и числа фаз для питания АТД

a



б

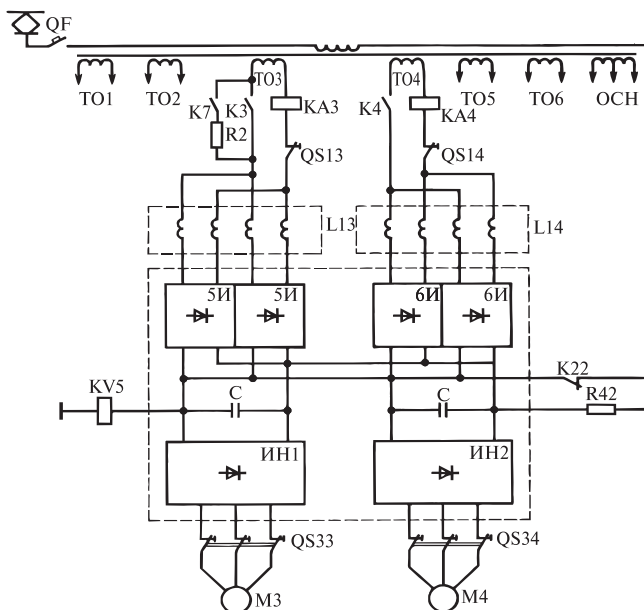


Рис. 1.25. Общий вид электровоза ВЛ86^Ф (*a*) и принципиальная схема силовых цепей одной тележки (*б*): QF — главный выключатель; KA3, KA4 — реле максимального тока; KV5 — реле заземления; QS13, QS14 — разъединители преобразователей; TO1—TO6 — тяговые обмотки трансформатора; K3, K4, K7, K22 — контакторы; L13, L14 — сетевые дроссели; R2 — зарядный резистор; C — фильтровые конденсаторы; R42 — разрядный резистор; QS33, QS34 — разъединитель тяговых двигателей; 5И, 6И — выпрямительные мосты; ИН1, ИН2 — инверторы напряжения; М3, М4 — асинхронные тяговые двигатели

тока — схема с входным импульсным регулятором (или без него) и автономным инвертором напряжения.

При применении на электровозе переменного тока 4q-S-преобразователя с широтно-импульсной модуляцией практически не искажается форма напряжения контактной сети и обеспечивается коэффициент мощности, близкий к единице, при изменении нагрузки в широком диапазоне.

Работы по созданию асинхронного тягового привода электровозов были начаты в нашей стране в середине 60-х гг. XX в. В 1968 г. была построена макетная секция грузового восьмиосного электровоза с АТД, а в 1971 г. Новочеркасский электровозостроительный завод по проекту ВЭЛНИИ изготовил опытный образец такого электровоза ВЛ80А-751 с часовой мощностью 9600 кВт.

Следующим этапом работ в этом направлении стало создание грузового двенадцатиосного электровоза переменного тока ВЛ86^Ф. Статические преобразователи для этих электровозов были созданы с использованием традиционных быстродействующих тиристоров. Например, преобразователь электровоза ВЛ86^Ф (рис. 1.25, а) был построен на тиристорах ТБ-253 12-го класса со временем выключения 40 мкс и ТБ-253 14-го класса со временем выключения 50 мкс. Позднее в статических преобразователях начали применяться ГТО-тиристоры и IGBT-транзисторы.

Принципиальная схема силовых цепей электровоза ВЛ86^Ф показана на рис. 1.25, б, его тяговая характеристика — на рис. 1.26.

Опытная эксплуатация первых электровозов с АТП позволила найти оптимальные решения по схемам преобразователей, конструкции тяговых двигателей и алгоритмам системы управления.

Следует подчеркнуть, что в отличие от зарубежных

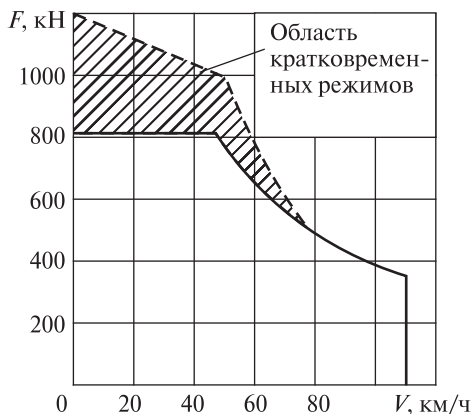


Рис. 1.26. Тяговая характеристика электровоза ВЛ86^Ф: F — сила тяги электровоза; V — скорость электровоза

фирм-производителей, отечественные электровозостроители с самого начала планировали использовать асинхронный тяговый привод в первую очередь для грузовых электровозов, а не для скоростных.

Характеристики отечественных опытных электровозов с АТП приведены в табл. 1.11.

При создании локомотивов с АТП возникает необходимость решения ряда крупных задач, с которыми ранее сталкиваться не приходилось.

Прежде всего, величина потерь в современных полупроводниковых приборах такова, что возникает необходимость применения более сложной воздушно-жидкостной системы охлаждения преобразователей, вместо воздушной.

Таблица 1.11

**Характеристики отечественных опытных локомотивов
с асинхронным тяговым приводом**

Характеристика	Электровозы				
	ВЛ80А	ВЛ86Ф	ЭП10	ЭП20	2ЭС5
Год выпуска	1971	1985	1998	2011	2011
Род тока	~	~	~ / =	~ / =	~
Осевая формула	2(2о-2о)	2(2о-2о-2о)	2о-2о-2о	2о-2о-2о	2(2о-2о)
Конструкционная масса, т	184	300	135	129	200
Мощность в часовом режиме, кВт	9600	11 400	7200	7200	8400
Сила тяги в часовом режиме, кН (тс)	447,86 (45,7)	803,6 (82)	314,58 (32,1)	325,36 (33,2) / 249,9 (25,5)	589,96 (60,2)
Скорость в часовом режиме, км/ч	50	50	120	78/100	50
Скорость конструкционная, км/ч	110	110	160	160 (200)	120
Вид электрического тормоза	—	Рекупер.	Рекупер.	Рекупер., реостатное	Рекупер., реостатное

Характеристика	Тепловозы					
	ВМЭ1А № 024	ТЭ120	2ТЭ137	ТЭМ2	ТЭМ21	2ТЭ25А
Год выпуска	1969 (макет)	1976 (макет)	1990	1999	2001	2006
Осевая формула	2о-2о	3о-3о	2(3о-3о)	1о+1+1о- 1о +1+1о	2о-2о	2(3о-3о)
Службная масса (с 2/3 запаса топлива и песка), т	74	132	2×149,5	120	92	2×144
Нагрузка от колесной пары на рельсы, кН (тс)	181,5 (18,5)	215,0 (21,9)	244,2 (24,9)	196 (20,0)	225,6 (23,0)	235,4 (24)
Мощность по дизелю, кВт	441	2940	2×2940	882	1103	2×2500
Сила тяги, кН (тс) при трогании	254,0 (25,9)	402 (41,0)	2×490,0 (2×50,0)	320,0 (32,6)	320,0 (32,6)	2×441,5 (2×45,0)
при длительной скорости	81,6 (8,32)	260 (26,5)	2×392,0 (2×40,0)	300 (30,6)	300 (30,6)	2×390 (2×39,8)
Скорость длительного режима, км/ч	15,0	30,0	21,0	7,0	9,4	18,5
Скорость конструкционная, км/ч	80	120	120	100	100	120

По этой же причине возникает вопрос о повышении КПД, причем не только за счет повышения КПД оборудования, входящего в силовую цепь (трансформатор, статический преобразователь, тяговые двигатели), но и за счет разработки энергосберегающих алгоритмов управления тяговым и вспомогательным приводами.

Из-за появления на локомотиве с АТП еще одной ступени преобразования полной мощности возрастает объем, занимаемый преобразователем. Как следствие, пришлось отказаться от традиционной компоновки оборудования в кузове электровоза и выполнять ее не с двумя, а с одним центральным проходом (рис. 1.27).

Повышенная пульсация момента АД, особенно при низких скоростях, вызывает опасные механические напряжения в узлах ходовой части, в местах крепления оборудования, особенно в

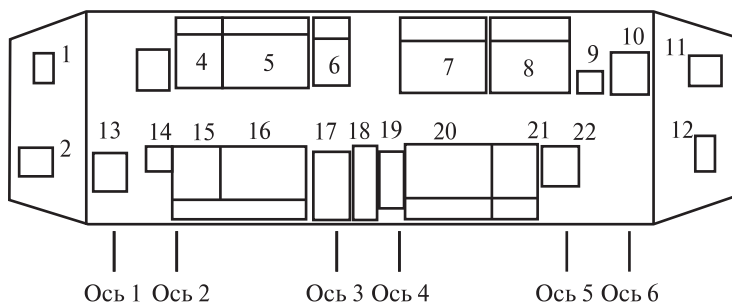


Рис. 1.27. Расположение оборудования в кузове электровоза ЭП10: 1, 12 — дисплей с клавиатурой; 2, 11 — шкаф с электронной системой управления; 3, 6, 10, 13, 17, 22 — мотор-вентилятор тяговых двигателей; 4, 15, 21 — блок охлаждения тягового преобразователя и трансформатора; 5, 16, 20 — тяговой преобразователь; 7 — трансформатор; 8 — вспомогательные преобразователи; 9, 14, 19 — шкаф с электронной системой управления; 18 — зарядное устройство аккумуляторной батареи

точках подвешивания тяговых двигателей и зубчатого редуктора, в стержнях обмотки ротора. Неблагоприятное воздействие указанных факторов может быть снижено за счет конструкторских и схемных решений и усовершенствования программного обеспечения микропроцессорной системы управления.

При создании и эксплуатации электровозов с АТП необходимо предусмотреть специальные меры для обеспечения электромагнитной совместимости с системами тягового электроснабжения и железнодорожной связи, а также сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ). Здесь нужно не только контролировать величину помех, создаваемых локомотивом, но и повышать помехозащищенность и помехоустойчивость цепей СЦБ.

1.4.2. Тепловозы с электрической передачей переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями

«Типаж» перспективного подвижного состава ориентирует разработчиков и производителей тепловозов на широкое внедрение технических решений с использованием тяговых приводов на основе бесколлекторных двигателей и статических преобразователей частоты с микропроцессорными системами управления. Основным типом тягового привода, заложенном в «Типаже» для перспектив-

ных грузовых, пассажирских и маневровых тепловозов, является электропередача переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями (см. ниже табл. 1.14).

Помимо достоинств АТП, отмеченных выше в п. 1.4.1, применительно к тепловозам можно подчеркнуть следующее.

1. По данным американской железной дороги Burlington Northern (BN), при использовании АТД на локомотивах практически полностью устраняются повреждения тяговых двигателей. Только за счет повышенной надежности АТД экономия на ремонтных расходах составляет до 40 тыс. долл. США на локомотив в расчете на срок службы. Приобретение больших партий новых локомотивов позволило повысить эксплуатационную надежность парка тягового подвижного состава с 80 до 90%.

2. Режим электродинамического (реостатного) торможения реализуется устойчиво в широком диапазоне нагрузок и скоростей практически до полной остановки состава при более высоких значениях КПД, чем у тепловозов с коллекторными тяговыми двигателями. У двигателей постоянного тока ограничение тормозных усилий в области высоких скоростей определяется потенциальными условиями на коллекторе, а у АТД таких ограничений нет. Все это приводит к существенному снижению расхода тормозных колодок и времени на их замену.

3. Применяемая схема питания тягового привода позволяет не снижать уровень питающего напряжения тягового генератора при трогании тепловоза. Это открывает широкие возможности по внедрению вспомогательных преобразователей собственных нужд, а для пассажирских тепловозов — преобразователей напряжения для отопления и кондиционирования вагонов, питаемых непосредственно от тягового выпрямителя. При этом за счет использования энергии рекуперации для питания указанных преобразователей при торможении поезда можно в некоторых случаях экономить до 10—15 % топлива, что позволит окупить затраты на тяговый привод в течение трех-четырех лет.

4. Появляется возможность избавиться на тепловозах от стартер-генератора, применив для запуска дизеля тяговый синхронный генератор, питаемый от аккумуляторной батареи через силовой инвертор.

В 1968 г. на базе маневрового тепловоза ВМЭ1А-024 был создан макетный тепловоз с АТД, питаемыми от автономного инвертора напряжения.

По результатам испытаний был построен магистральный тепловоз ТЭ120, оснащенный асинхронными тяговыми двигателями ЭД900. Был разработан и построен специальный стенд для исследований тяговой передачи с АТД, разработан и изготовлен преобразователь частоты ПЧТ-3У2. Эти работы сопровождались серьезными научно-техническими исследованиями, большим объемом опытно-конструкторских работ.

На испытаниях опытных образцов тепловозов всегда отмечались их хорошие тяговые качества и приемлемая энергетика. Но из-за низкой надежности преобразовательных устройств того времени создать тепловозы с АТД для эксплуатационной работы так и не удалось.

Технические характеристики отечественных тепловозов с асинхронным тяговым приводом приведены в табл. 1.11.

Первым тепловозом с АТД, который удалось довести до эксплуатации, стал тепловоз 2ТЭ25А «Витязь», разработанный ОАО «ВНИКТИ» совместно с ЗАО УК «БМЗ». Общий вид тепловоза 2ТЭ25А показан на рис. 1.28, его тяговая и тормозная характеристики — на рис. 1.29.



Рис. 1.28. Тепловоз 2ТЭ25А «Витязь»

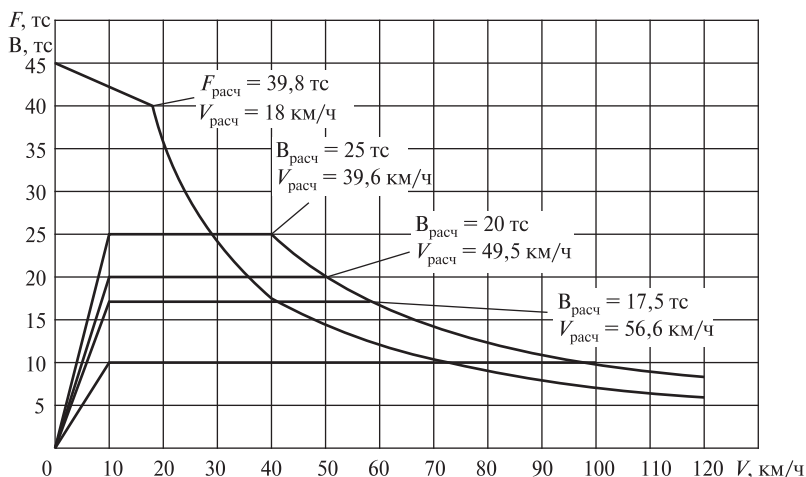


Рис. 1.29. Тяговая и тормозная характеристики теплового вагона 2ТЭ25А (одна секция)

Тепловоз создан полностью на отечественной технологической базе. Тяговый преобразователь, выполненный на IGBT-транзисторах, является ключевым инновационным элементом «Витязя». В конструкции теплового вагона применяется V-образный дизель типа Д49 с электронным впрыском; трехосные тележки с радиальной установкой колесных пар, двухступенчатым рессорным подвешиванием и догрузателями на крайних осях. Тепловоз оборудован электрическим реостатным тормозом, микропроцессорной системой контроля, управления и диагностики.

В настоящее время тепловоз «Витязь» введен в рядовую эксплуатацию.

Существенное повышение надежности тяговых преобразователей, ставшее возможным за счет использования современных силовых полупроводниковых приборов и микропроцессорных систем управления ими, снижение их цены и массогабаритных показателей позволяет предположить, что они найдут широкое применение на всех перспективных тепловозах нового поколения.

Расчетная мощность перспективных грузовых магистральных тепловозов должна быть такой, чтобы минимальная допустимая длительная скорость движения соответствовала скорости выхо-

да тепловоза в точку ограничения мощности. На «Витязе» указанная скорость составляет 18 км/ч (см. рис. 1.29). Тяговые электродвигатели и преобразователи позволяют двигаться тепловозу с такой скоростью неограниченно долго (в отличие от тепловозов с коллекторными двигателями, где имеется ограничение по перегреву обмоток при низкой частоте вращения на полной мощности).

Для реализации в полной мере потенциальных возможностей асинхронного тягового привода мощность тепловоза по дизелю должна обеспечивать повышение длительной скорости локомотива до уровня не ниже 23—25 км/ч. Подняв секционную мощность до 3500 кВт, можно выйти на полную мощность при минимальной скорости около 24 км/ч. Это позволит унифицировать весовые нормы для электровозной и тепловозной тяги, а значит, избежать расформирования составов на стыковых участках, соблюдать среднюю участковую скорость движения составов.

Основные типы отечественных грузовых и пассажирских тепловозов с электропередачей переменного тока с АТД, которые в ближайшей перспективе должны появиться на отечественных железных дорогах, приведены в табл. 1.12. Основные технические решения и комплектующие элементы тяговых приводов, использованные в тепловозе 2ТЭ25А, должны получить здесь дальнейшее развитие и совершенствование. Для магистральных грузовых тепловозов целесообразно использовать тяговые преобразователи с индивидуальным (поосным) регулированием силы тяги. Для маневровых и пассажирских тепловозов с целью снижения стоимости тяговых преобразователей и упрощения всей конструкции электропривода целесообразно выполнять тяговые преобразователи с параллельным потележечным подключением тяговых электродвигателей.

Безусловно перспективным направлением следует считать скорейшее внедрение асинхронного электропривода на высокоскоростных пассажирских тепловозах. Главное преимущество при этом — возможность использования мощных, малогабаритных АТД, которые не имеют коллектора и соответственно исключают круговой огонь на высоких оборотах как в режиме тяги, так и в режиме электрического реостатного торможения.

Таблица 1.12

**Перспективные типы отечественных тепловозов с электропередачей
переменного тока и АТД**

Тип тепловоза	Количество секций	Мощность по дизелю, кВт	Количество осей в секции
2ТЭ25А	2	2500	6
2ТЭ35А	2	3500	6
ТЭ35А	1	3500	6
ТЭ25А	1	2500	6
ТЭМ10	1	1000	6
ТЭП35	1	3500	6
ТЭП20	1	2000	4

1.5. Требования к перспективному тяговому подвижному составу. Типажи

Главное, что определяет технико-экономические характеристики локомотивов — это способ преобразования электрической энергии, получаемой либо от контактного провода (на электровозе), либо от автономного дизель-генератора (на тепловозе), в механическую. Такое преобразование осуществляется тяговым приводом, в состав которого входят тяговый электродвигатель, силовой преобразователь (либо другое устройство для регулирования силы тяги и скорости движения локомотива) и система управления.

Как уже было сказано выше, на электровозах и тепловозах с электрической передачей, находящихся в настоящее время в эксплуатации на российских железных дорогах, применяется практически исключительно привод с коллекторными тяговыми двигателями постоянного (либо пульсирующего) тока. Тяговые статические преобразователи на этих локомотивах выполнены на силовых кремниевых диодах (если применяется ступенчатое регулирование напряжения тяговых двигателей) или тиристорах (при плавном регулировании).

Появление новых типов высокочастотных полупроводниковых приборов, обладающих большой единичной мощностью (GTO-тириستоров, IGBT-транзисторов, IGCT-тиристоров) в сочетании с микропроцессорными системами управления позволило сделать следующий шаг в деле совершенствования схем и конструкций тягового подвижного состава с электроприводом: отказаться от

применения коллекторного тягового двигателя постоянного (пульсирующего) тока и создать локомотивы с бесколлекторными трехфазными тяговыми двигателями переменного тока, питающимися от статических преобразователей.

Требования к локомотивам и их основные параметры устанавливаются документами, называемыми «Типажи». Более детальные технические требования утверждаются ОАО «РЖД» применительно к конкретным локомотивам (например, для электровозов ЭП20, 2ЭС5 и т.д.).

Главная цель создания «Типажей» перспективного тягового подвижного состава — обеспечение минимизации стоимости жизненного цикла. Разрабатывая эти требования, исходят из того, что выпуск базовых моделей локомотивов (в различных модификациях) продолжается 15—20 лет, а срок жизни локомотива составляет 30—40 лет. Это значит, что характеристики перспективных локомотивов должны быть научно обоснованными, а конструкция и схемы — тщательно отработанными.

При этом осевая мощность должна быть такой, чтобы имелась возможность ее реализации по сцеплению в различных условиях эксплуатации; локомотив должен иметь минимальное воздействие на путь, в том числе в кривых участках; затраты энергии на единицу полезной работы были бы как можно меньше.

Опыт показывает, что с увеличением осевой мощности коэффициент ее использования снижается за счет равнинных участков пути и вождения неполновесных поездов. При неполной загрузке силового оборудования снижается КПД локомотива, а на тяговом подвижном составе переменного тока — и коэффициент мощности.

В конце 2002 г. МПС РФ утвердил новый «Типаж» перспективных локомотивов. Основные параметры электровозов, включенных в «Типаж», приведены в табл. 1.13, тепловозов — в табл. 1.14. В основу «Типажа» положен принцип специализации локомотивов по видам службы.

Локомотивы различных типов должны создаваться с использованием единых базовых платформ при условии максимальной унификации оборудования. Например, магистральные электровозы с АТД (постоянного 3 кВ и переменного 25 кВ, 50 Гц токов) могут быть унифицированы по: тяговым двигателям; устройствам систем

Таблица 1.13

Типы и основные параметры перспективных электровозов

Условное обозначение типа	Л1		Л2		Л3		Л4		Л5	
	ЭП2	ЭП3	ЭП4	ЭП5	ЭП100	ЭП200	Э2	Э3		
Условное обозначение серии										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Род тока	=	~	=	~	=	~	=	~	=	~
Род службы	пассажирский			скоростной			грузовой			
Осевая формула	2о-2о-2о, 3о-3о		2о-2о		2о+2о-2о+2о		2о-2о-2о		2о-2о, 2(2о-2о)	
Служебная масса, т	129—135		86—90		152—160		138—150		92—100, 2×(92—100)	
Номинальная осевая нагрузка, кН	211—221				186—196		226—245			
Конструкционная скорость, км/ч	160				200		120			
Тип тягового привода	третьего класса (с опорно-рамным подвешиванием ТЭД и тяговых редукторов)*				первого класса (с опорно-осевым подвешиванием ТЭД)					
Мощность продолжительного режима на валах тяговых двигателей, кВт	6600		4400		7800		5700—6000		3800—4000 2×(3800—4000)	
Сила тяги расчетного режима, кН	310		210		280		370—390		240—260 2×(240—260)	
Максимальная сила тяги при трогании, кН	400		265		400		564—588		376—392 2×(376—392)	

Окончание табл. 1.13

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Сила тяги при максимальной скорости, кН	147		98		140		170—180		114—120 2×(114—120)	
Мощность электрического тормоза на валах ТЭД, кВт:										
рекуперативного на постоянном и переменном токе;	не менее 6000		не менее 4000		не менее 6500		5700—6000		3800—4000 2×(3800—4000)	
реостатного на постоянном токе	не менее 4500		не менее 3000		не менее 4500		4200—4500		2800—3000 2×(2800—3000)	

Примечания. 1. Параметры тока тягового электроснабжения: постоянного (=) 3 кВ; переменного (~) 25 кВ, 50 Гц.

2. Тяговый двигатель асинхронный. До освоения производства преобразователей для питания асинхронных ТЭД допускается применение ТЭД других типов.

3. Система управления — электронная микропроцессорная.

4. Коэффициент мощности переменного тока в диапазоне мощностей от 0,25 продолжительной до максимальной не менее 0,95.

5. Значение скорости номинального режима «Типажом» не определено. Как правило, для грузовых электровозов она равна примерно 50 км/ч; для пассажирских — половине конструктивной скорости.

6. Знак «звездочка» (*) означает, что допускается также применение тяговой передачи второго класса с опорно-осевым подвешиванием редуктора.

Таблица 1.14

Типы и основные параметры перспективных тепловозов

Условное обозначение типа	Л6		Л7		Л8		Л9	Л10
	ТЭП35	ТЭП25	ТЭ35 (2ТЭ35)	ТЭ25 (2ТЭ25)	ТЭ15 (2ТЭ15)	ТЭМ10		
Условное обозначение серии	2	3	4	5	6	7	8	9
Мощность одной секции (по дизелю), кВт	3500	2500	3500 (2×3500)	2500 (2×2500)	1500 (2×1500)	800—1000	1000	1650 (2×1650)
Род службы	пассажирский		грузовой		маневрово-вывозной	маневровый	маневрово-вывозной с питанием от контактной сети	грузо-пассажирский
Осевая формула			3о-3о 2(3о-3о)		3о-3о (2о-2о)		2о-2о 2(2о-2о)	
Служебная масса, т	129—135		138—150 2×(138—150)		138 (2×138)	135 (90)		90 (2×90)
Номинальная осевая нагрузка, кН	211—221		226—245		226	221		
Конструкционная скорость, км/ч	140		120		100		120	
Тип электрической передачи	переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями или переменного-постоянного тока (по требованию заказчика)						переменно-постоянного тока	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип тягового привода	третьего класса (с опорно-рамным подвешиванием ТЭД и тяговых редукторов)		первого класса (с опорно-осевым подвешиванием ТЭД)					
Сила тяги расчетного режима, кН	210	170	390—430* 2×(390—430)	300—390* 2×(300—390)	300 2×300	250		205 (2×205)
Максимальная сила тяги при трогании, кН, не менее	300		510 (2×510)		430 (2×430)	360 (240)		280 (2×280)
Скорость расчетного режима, км/ч	48 (35,6)**	42,3 (32,2)**	23,4	24—18,5	14,4	9,2—11,5	11,5	23,0
Сила тяги при максимальной скорости, кН	72	51,4	84 (2×84)	60 (2×60)	36 (2×36)	23—28,8	28,8	39,3 (2×39,3)
Мощность электрического тормоза на валах ТЭД, кВт	3200	2800	3200	2800	1400			

* Больше значение соответствует случаю применения асинхронных тяговых двигателей.

** В скобках указана скорость при отборе мощности на энергоснабжение вагонов поезда.

Примечание. Система управления — электронная микропроцессорная.

преобразования электроэнергии (инверторы); вспомогательному оборудованию; устройствам защиты, управления и обеспечения безопасности; конструкциям тележек и силовых передач; устройствам связей кузова с тележками и передачи тягового усилия и др. Такая унификация выгодна и производителям локомотивов, и тем, кто их эксплуатирует, обслуживает и ремонтирует.

Кроме того, могут производиться электровозы на два рода тока: постоянный 3 кВ и переменный 25 кВ, 50 Гц.

Утверждение «Типажа» открывает возможность уверенно инвестировать средства в создание и подготовку производства новых типов локомотивов, а это, как показывает опыт, достаточно большие средства, отвлекаемые на сравнительно длительный срок.

Требования к характеристикам перспективных локомотивов устанавливались исходя из того, что основным показателем успешного функционирования и развития российских железных дорог должна стать минимизация совокупных затрат на единицу полезной работы, а параметры тягового подвижного состава являются определяющими для экономики перевозок.

Минимизировать расходы в эксплуатации можно несколькими путями:

- повышая единичную (осевую) мощность локомотивов до величины, которую можно реально использовать по условию сцепления;
- снижая повреждаемость и повышая коэффициент готовности;
- повышая производительность технических средств и обслуживающего персонала;
- снижая энергозатраты на единицу полезной работы;
- обеспечивая безопасность персонала и сохранность грузов.

Каждая вновь разрабатываемая серия электровозов и тепловозов должна соответствовать одному из предусмотренных типов локомотивов.

Пассажирские и грузовые электровозы должны позволять формировать сцепы с различным количеством тяговых осей с управлением по системе многих единиц для использования в условиях изменяющихся пассажиро- и грузопотоков, а также для обслуживания грузо-пассажирских и контейнерных поездов.

Грузовые электровозы формируются из шестиосных и четырехосных секций. Это позволяет оптимально подбирать требуемую мощность по числу осей: 6, 8, 12, 16.

Для специализированных линий могут производиться грузовые локомотивы с нагрузкой от колесной пары на рельсы до 294 кН (30 тс).

Прогресс по тепловозам будет достигаться за счет повышения КПД дизелей во всем диапазоне нагрузок, применения электрической передачи переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями, использования в качестве топлива природного газа.

На магистральных грузовых тепловозах также должна быть предусмотрена возможность работы по системе многих единиц.

Пассажирские электровозы и тепловозы должны обеспечивать электроснабжение пассажирских вагонов. Маневровые тепловозы должны допускать обслуживание в одно лицо.

«Типаж» требует, чтобы несущая способность конструкций кузова обеспечивала безопасность локомотивной бригады при столкновении с подвижным составом или наезде на препятствие со скоростью до 20 км/ч.

При использовании опорно-осевого подвешивания ТЭД должны применяться моторно-осевые подшипники качения.

«Типажом» предусмотрено, что для всех типов новых локомотивов должны применяться асинхронные тяговые двигатели. Однако до освоения отечественной промышленностью производства тяговых статических преобразователей частоты и числа фаз возможны разработка и выпуск локомотивов переходного периода с коллекторными тяговыми двигателями постоянного (пульсирующего) тока.

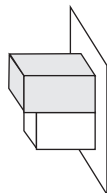
Для привода вспомогательных механизмов на локомотивах всех типов должны применяться трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором.

Указанные в «Типаже» мощности и скорости электровозов должны реализовываться при уменьшении напряжения на токоприемнике до 24 кВ на переменном и до 2,9 кВ на постоянном токе. При уменьшении напряжения ниже указанных значений мощность электровоза пропорционально снижается.

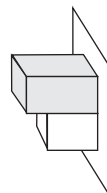
Электровозы

Эксплуатационные показатели

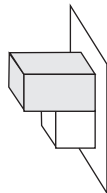
Расходы



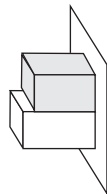
Вес поезда, т (+20 %)



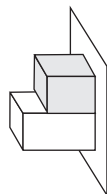
Время в движении, ч
(+50 %)



Производительность локомотива, т-км брутто/сут
(+70 %)

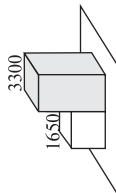


Удельный расход электроэнергии, кВт-ч/10⁴ т-км брутто
(-15 %)

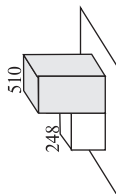


Расходы на ремонт
(-50 %)

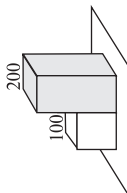
Тепловозы



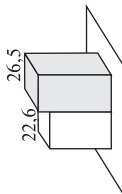
Увеличение секционной мощности на тягу, кВт
(в 2 раза)



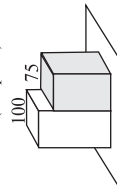
Увеличение силы тяги длительного режима, кН
(в 2 раза)



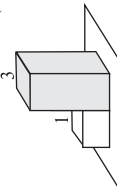
Увеличение производительности
(в 2 раза)



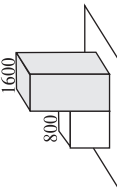
Повышение осевой нагрузки, тс



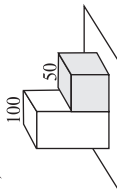
Снижение удельного эксплуатационного расхода топлива
(в 1,3 раза)



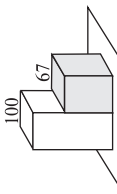
Увеличение пробега между техническими обслуживаниями, мес.
(в 3 раза)



Увеличение пробега до капитального ремонта, тыс. км
(в 2 раза)



Снижение расходов на техническое обслуживание и ремонт
(в 2 раза)



Снижение материалоемкости
(в 1,5 раза)

Рис. 1.30. Планируемое улучшение эксплуатационных характеристик перспективных локомотивов (светлый фон — существующие локомотивы, темный — перспективные)

Максимальная скорость электровоза должна обеспечиваться вплоть до минимально допустимого в эксплуатации диаметра бандажей колесных пар 1170 мм.

Бортовая микропроцессорная система локомотива должна обеспечивать по командам с пульта машиниста управление всеми системами, в том числе тяговыми и вспомогательными приводами, аппаратами цепей управления, защиты, безопасности движения, автоведения, диагностики и контроля нагрева основного оборудования. Система управления выполняется по двухуровневой схеме. Должна быть предусмотрена возможность тестирования электрической схемы и системы управления.

В тяговом режиме и в режиме электрического торможения система управления должна обеспечивать поддержание заданной машинистом силы тяги или тормозной силы в пределах ограничения по мощности до достижения заданной скорости, реверсирование тяговых двигателей, ограничение тока тяговых двигателей и статических преобразователей по заданным допустимым значениям. Должна быть обеспечена защита от боксования и юза, с импульсной подачей песка под переднюю колесную пару, а также предусмотренное инструкциями взаимодействие пневматического и электрического тормозов.

Отдельные узлы, системы и устройства должны соответствовать действующим в РФ нормативным документам, перечень которых приведен в Приложении П2.

Использование при создании новых локомотивов более совершенных методов расчета и конструирования, новых материалов и технологий, применение бортовых систем диагностики технического состояния основного оборудования позволит снизить эксплуатационные затраты, в том числе за счет повышения коэффициента готовности локомотивов.

В результате выпуска нового предусмотренного «Типажом» тягового подвижного состава будет снижено вредное влияние железнодорожного транспорта на окружающую среду.

Планируемое улучшение конкретных показателей эксплуатационной работы за счет применения новых локомотивов, предусмотренных действующим «Типажом», показано на рис. 1.30.

Глава 2. АСИНХРОННЫЕ ТЯГОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

В главе 2 дано описание устройства и принципа действия асинхронного двигателя. Приводится описание конструкций асинхронных тяговых двигателей электровозов и тепловозов, выпущенных отечественной промышленностью, представлены их основные параметры. Отмечены основные достоинства АТД — большая удельная мощность, простота конструкции, надежность в эксплуатации.

Дана характеристика условий работы тяговых двигателей локомотивов в нашей стране (климатические условия, вибрации и т.д.) и предъявляемые к ним технические требования.

Рекомендуемая литература: [2, 3, 4, 11, 13, 17, 19].

2.1. Устройство и принцип работы асинхронного двигателя

Среди электрических двигателей общепромышленного назначения наибольшее распространение получили трехфазные асинхронные двигатели, созданные М.О. Доливо-Добровольским в конце XIX в.

Принцип действия асинхронного двигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля, которое создается трехфазными обмотками, находящимися на статоре, с токами, возникающими в контурах ротора. Благодаря чередованию фаз в неподвижно расположенных обмотках создается магнитный поток, вращающийся в пространстве со скоростью n_1 , соответствующей частоте питающего тока (рис. 2.1). Частота вращения ротора n_2 зависит не только от частоты приложенного напряжения, но и от величины нагрузки.

Согласно закону Ленца, взаимодействие наведенного тока с магнитным потоком создает момент, противодействующий причине возникновения этого тока. Ток вызывается в данном случае относительным перемещением потока и ротора. Следовательно, создается момент, стремящийся уменьшить относительную скорость магнитного потока и проводников ротора, т.е. момент, приводящий ротор во вращение в сторону вращения поля. Однако скорость вращения ротора всегда меньше скорости вращения потока, ибо лишь при этом условии возможно пересечение проводников

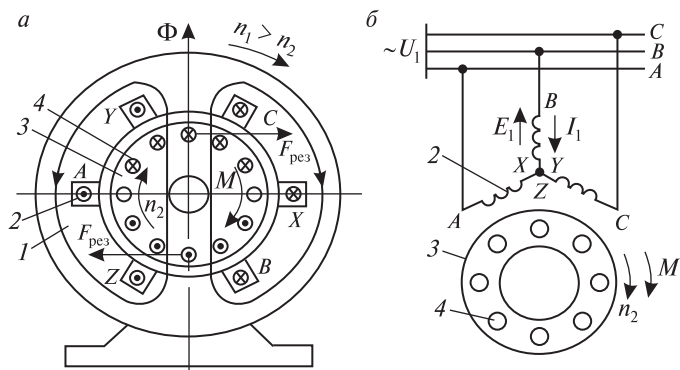


Рис. 2.1. Электромагнитная схема асинхронной машины при работе в двигательном режиме: *a* — поперечное сечение, *б* — схема питания; 1 — статор; 2 — обмотка статора; 3 — ротор; 4 — обмотка ротора

ротора вращающимся полем и появление индуктированного в роторе тока. Отставание ротора от поля, лежащее в основе действия двигателя, обусловило появление термина «асинхронный», что значит «неодновременный».

Асинхронные тяговые двигатели (АТД) имеют две обмотки: статорную и роторную. Фазы *A*, *B*, *C* обмотки статора могут быть соединены либо в «звезду», либо в «треугольник». Для тяговых двигателей применяется соединение в «звезду». Обмотка ротора — короткозамкнутая.

При питании обмотки статора трехфазным напряжением возникает вращающееся магнитное поле (основной характеристикой которого является магнитный поток Φ) с частотой вращения n_1 , об/мин:

$$n_1 = 60 \frac{f_1}{p}, \quad (2.1)$$

где f_1 — частота питающего напряжения, Гц;
 p — число пар полюсов.

Если ротор двигателя неподвижен или частота его вращения меньше частоты вращения поля, то в проводниках ротора индуцируется ЭДС. На проводники с током, расположенные в магнитном поле, действуют электромагнитные силы $F_{\text{рез}}$, направленные вслед за вращением поля. Суммарное усилие всех проводников созда-

ет электромагнитный момент M , приводящий ротор во вращение. Таким образом, электрическая энергия, поступившая в обмотку статора, преобразуется в механическую.

Через тяговый зубчатый редуктор этот момент приводит во вращение колесную пару локомотива. Установившаяся частота вращения ротора n_2 соответствует режиму, когда электромагнитный момент равен моменту сопротивления. Изменение направления вращения осуществляется путем изменения порядка чередования фаз питающего напряжения.

Характерной особенностью асинхронной электрической машины является наличие скольжения s . Скольжением называется относительная разность частот вращения магнитного поля и ротора двигателя

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 1 - \frac{n_2}{n_1}. \quad (2.2)$$

В двигательном режиме

$$0 < n_2 < n_1,$$

т.е.

$$0 < s < 1.$$

В момент пуска $n_2 = 0$, поэтому $s = 1$. В режиме электрического торможения $s > 1$.

Скольжение s можно выразить в процентах, оно делается по возможности малым, порядка нескольких процентов. Поэтому скорость вращения ротора мало отличается от скорости поля.

Для расчета токов в обмотках, потребляемой мощности, мощности потерь, электромагнитного момента и т.п. асинхронный двигатель можно представить в виде электрической схемы замещения. Т-образная схема замещения асинхронного тягового электродвигателя показана на рис. 2.2, где: U_1 — напряжение питания, приложенное к статору; пренебрегая падением напряжения в обмотке статора, считаем $|U_1| \approx |E_1|$, здесь E_1 — ЭДС фазы статора; r_1 и $x_{\sigma 1}$ — активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора; r_2' и $x_{\sigma 2}'$ — активное сопротивление

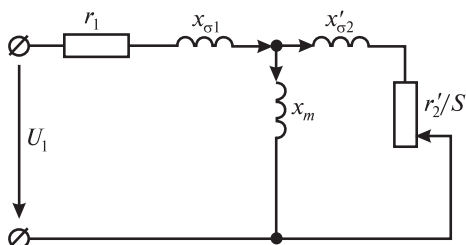


Рис. 2.2. Схема замещения асинхронного тягового электродвигателя (через r'_2/s обозначено мгновенное значение переменного сопротивления резистора)

и индуктивное сопротивление рассеяния цепи ротора, приведенные к статору; x_m — индуктивное сопротивление взаимной индукции.

Для того чтобы в дальнейшем установить законы регулирования режимов работы АТД, запишем зависимость его момента M , Н·м, от фазного напряжения, параметров машины и скольжения (формула Клосса):

$$M = \frac{pm_1}{2\pi f_1} \cdot \frac{U_1^2}{\left(r_1 + c_1 \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x'_{\sigma 2})^2} \cdot \frac{r'_2}{s}, \quad (2.3)$$

где $m_1 = 3$ — число фаз обмотки статора;

c_1 — коэффициент, равный отношению питающего напряжения к противоЭДС двигателя; при расчетах можно принять $c_1 \approx 1,01$ — $1,03$.

Отсюда ясно, что при заданном скольжении s момент пропорционален квадрату действующего значения приложенного напряжения.

Вид зависимости величины момента АТД от скольжения s при постоянном значении приложенного напряжения показан на рис. 2.3.

Мощность на валу асинхронного двигателя равна

$$P = m_1(1-s) \frac{U_1^2}{\left(r_1 + c_1 \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x'_{\sigma 2})^2} \cdot \frac{r'_2}{s}. \quad (2.4)$$

Из (2.1) находим частоту вращения ротора асинхронного двигателя n_2 , об/мин:

$$n_2 = n_1(1-s) = \frac{60f_1(1-s)}{p}. \quad (2.5)$$

Из этой формулы следует, что регулирование частоты вращения ротора АД (т.е. управление скоростью движения локомотива) возможно двумя основными способами: изменением числа пар полюсов p и изменением частоты питающего напряжения f_1 .

При первом способе существенно усложняется конструкция АД и схема его питания, а регулирование скорости может быть только ступенчатым, что нежелательно для тягового подвижного состава. Поэтому для регулирования скорости

локомотива используется частотное регулирование, т.е. питание на АД подается от контактной сети или автономного источника (тягового генератора) через статические преобразователи частоты.

Именно проблемы, связанные с созданием статических преобразователей для регулирования частоты вращения ротора АД, долгое время сдерживали применение асинхронных двигателей на транспорте. Решение этих проблем стало возможным после освоения производства управляемых полупроводниковых приборов большой единичной мощности. В настоящее время выпуск статических преобразователей большой мощности, имеющих микропроцессорную систему управления, освоен и они успешно применяются на тяговом подвижном составе.

2.2. Конструкции и характеристики асинхронных тяговых двигателей

2.2.1. Особенности конструкции АД электровозов

Конструктивные узлы АД. Конструкция АД должна обеспечивать выполнение требований, предъявляемых к тяговым двигателям любого типа, независимо от принципов создания вращающего момента.

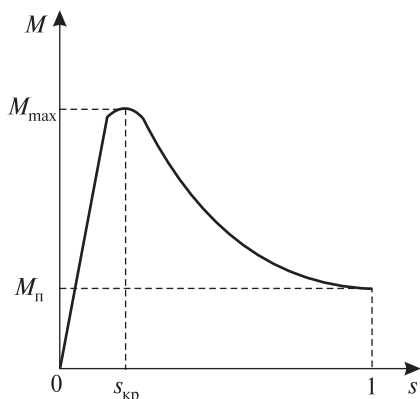


Рис. 2.3. Зависимость момента АД от скольжения: $s_{кр}$ — критическое скольжение, M_{max} — максимальное значение момента, M_n — пусковой момент

Магнитные системы статора и ротора изготавливаются из штампованных листов электротехнической стали. Конструкция статора при этом может быть корпусной или бескорпусной. Корпусное исполнение статора, как правило, применяют для двигателей, имеющих опорно-осевое подвешивание, бескорпусное — при опорно-рампном.

Остов АД не выполняет функций магнитопровода и поэтому может быть выполнен из алюминиевого сплава с армировкой сталью мест крепления. На рис. 2.4 показан продольный разрез АД с корпусным статором.

Двигатель бескорпусного исполнения не имеет единого литого или сварного остова. Он состоит из двух полукорпусов (подшипниковых щитов), между которыми зажат шихтованный сердечник, а вся система связана в единую конструкцию стальными стержнями (рис. 2.5). Полукорпуса имеют цилиндрические поверхности для посадки и крепления в них подшипниковых щитов, в которых размещаются подшипники качения.

Использование бескорпусного варианта позволяет снизить массу двигателя на 7—10 % при заданной мощности и частоте вращения, так как при этом примерно 40 мм в диаметральном направлении (удвоенная толщина стенки корпуса) используется дополнительно в качестве активного слоя для магнитного потока.

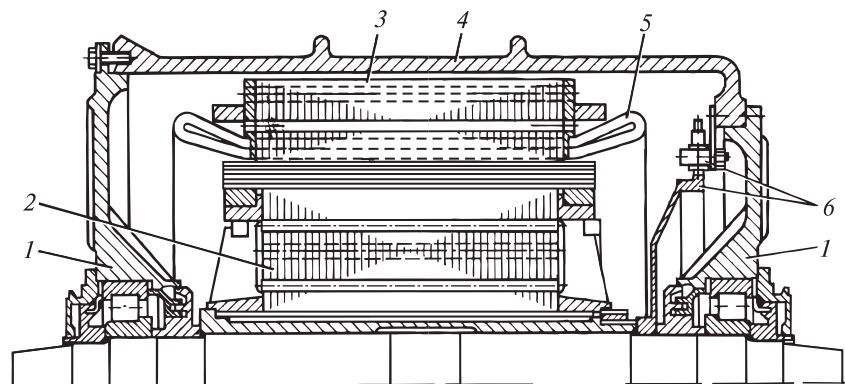


Рис. 2.4. Продольный разрез АД с корпусной конструкцией статора: 1 — щиты подшипниковые; 2 — ротор; 3 — статор; 4 — остов; 5 — обмотка статора; 6 — датчик частоты вращения

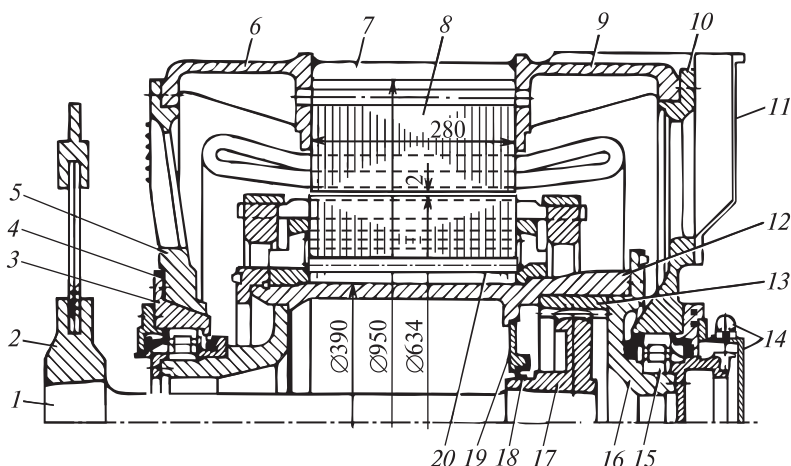


Рис. 2.5. Продольный разрез АТД с бескорпусной конструкцией статора: 1 — торсионный вал; 2 — резинокордная муфта; 3 — фланец подшипниковый; 4 — манжета; 5, 10 — подшипниковые щиты; 6, 9 — боковины остова; 7 — стяжные планки; 8 — магнитопровод статора; 11 — патрубок; 12 — втулка ротора; 13 — наружный венец зубчатой муфты; 14 — датчик частоты вращения; 15 — радиально-упорный роликовый подшипник; 16 — крышка втулки ротора; 17 — внутренний венец зубчатой муфты; 18 — уплотнительная манжета; 19 — фланец; 20 — ротор

Листы статора и ротора штампуются из тонколистовой электро-технической стали (обычно марки 2212 или 2412 толщиной 0,5 мм) с теплостойким изоляционным покрытием. Крайние листы выполняются из листов конструкционной стали толщиной 1 мм.

Тип и конструкция обмотки статора определяют энерго-экономические и эксплуатационные показатели двигателя, его надежность и ремонтпригодность.

При проектировании обмотки надо обоснованно определить обмоточные данные, схему соединения, требуемую электрическую прочность изоляции, ее ресурс и т.д. Большинство этих параметров определяются с учетом выходных параметров статических преобразователей, от которых АТД получает питание. Это значит, что разработчик двигателей не всегда может выбрать вариант, оптимальный для тягового двигателя. Оптимизировать в этом случае следует привод в целом (преобразователь и тяговый двигатель).

В первую очередь это накладывает ограничения на выбор типа и схемы обмотки.

В асинхронных тяговых двигателях преимущественно находят применение простые петлевые двухслойные обмотки с одной или несколькими параллельными ветвями в фазе (рис. 2.6, *а*).

Иногда применяются волновые двухслойные обмотки, но они имеют большое количество паяных соединений, изолировать которые можно только вручную.

Петлевая обмотка состоит из катушек (секций), количество которых равно числу пазов статора. Катушки обмотки укладываются в открытые прямоугольные пазы статора и крепятся с помощью клина из изоляционного материала (рис. 2.7).

Для уменьшения добавочных потерь и тока холостого хода можно использовать для закрепления статорной обмотки магнитные клинья. Порошковые материалы для прессования таких клиньев с магнитной проницаемостью, в несколько раз большей магнитной

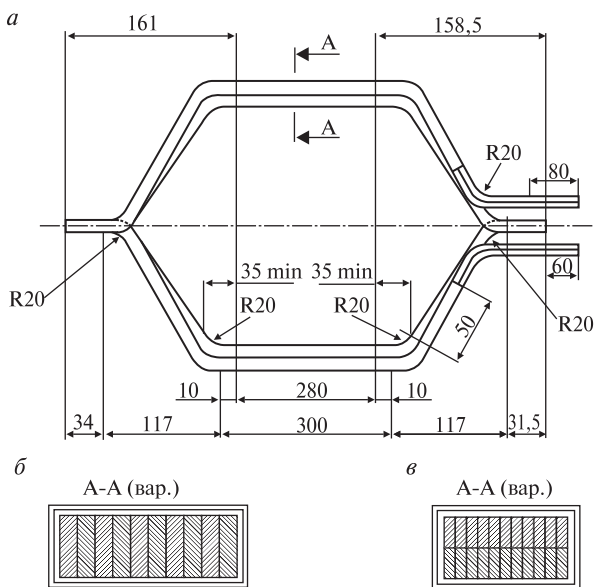


Рис. 2.6. Эскиз катушки статора АТД НТА-1200: *а* — общий вид; *б*, *в* — варианты укладки проводников в пазу статора

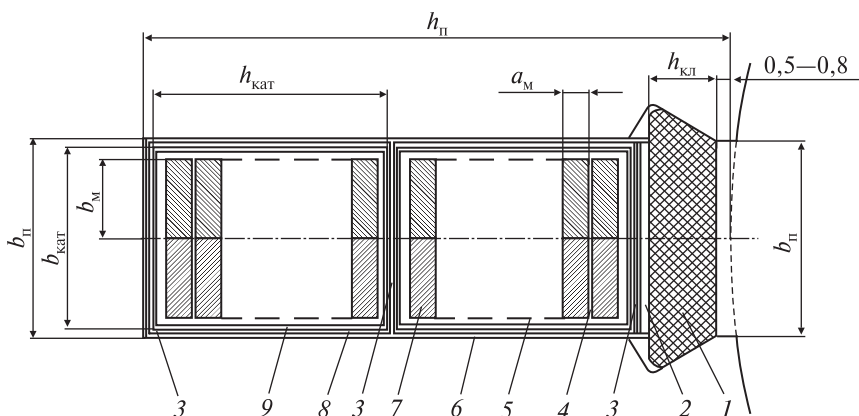


Рис. 2.7. Паз обмотки статора: 1 — клин; 2, 3, 4, 8, 9 — изоляционные прокладки; 5 — корпусная изоляция секции; 6 — гильза паза; 7 — проводник

проницаемости воздуха, выпускаются промышленностью. Использование магнитных клиньев уменьшает пульсацию индукции в воздушном зазоре и величину эквивалентного воздушного зазора.

При выборе формы сечения проводников статорной обмотки стремятся уменьшить повышение сопротивления за счет вытеснения тока в стержнях, особенно при повышенных частотах. В номинальном режиме частота питающего напряжения для применяемых в настоящее время двигателей, как правило, близка к 50 Гц, а в режиме максимальной скорости она может достигать 120—150 Гц. Снижение потерь из-за вытеснения тока достигается путем выбора рационального сечения проводника и расположения его в пазу. Меньший размер стержня обычно равен 2—3 мм и стержень в пазу укладывается плашмя (см. рис. 2.6, б).

Иногда для снижения вытеснения тока катушку выполняют из двух параллельных проводников, разделяя их по высоте (см. рис. 2.6, в). Но это можно реализовать при относительно малом числе проводников на паз.

Уложенные в пазы катушки обмотки соединяют между собой в полюсные и фазные группы с помощью шинных или кабельных перемычек. Нижние и верхние ветви лобовых частей катушек статорной обмотки увязываются между собой и прикрепляются к специальному кольцу-держателю (рис. 2.8).

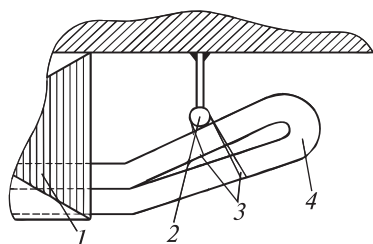


Рис. 2.8. Крепление лобовых частей обмотки статора: 1 — сердечник статора; 2 — изолированное кольцо-обмоткодержатель; 3 — шнур; 4 — лобовые части катушек

В современных АТД применяют роторы только с короткозамкнутой обмоткой. Это продиктовано тем, что двигатели с такой обмоткой имеют высокую надежность, низкую себестоимость и минимальные расходы на обслуживание по сравнению с двигателями с фазными роторами и, тем более, с коллекторными. В то же время питание такого асинхронного тягового двигателя от статического преобразователя числа фаз, амплитуды и частоты питающего напряжения позволяет

получить пусковые и рабочие характеристики с любым законом изменения во всем рабочем диапазоне.

Форма и геометрические размеры пазов ротора при заданных эксплуатационных параметрах тягового двигателя выбираются из условия обеспечения наилучших энергетических показателей при работе на основной гармонике питающего тока.

Оценка влияния на эти характеристики высших гармонических напряжения (тока), которые всегда присутствуют при питании асинхронного тягового двигателя от статического преобразователя частоты и числа фаз, возможно только в результате глубоких теоретических и экспериментальных исследований с учетом конкретных алгоритмов управления приводом. Некоторые возможные варианты формы паза и конструкции исполнения обмотки ротора показаны на рис. 2.9.

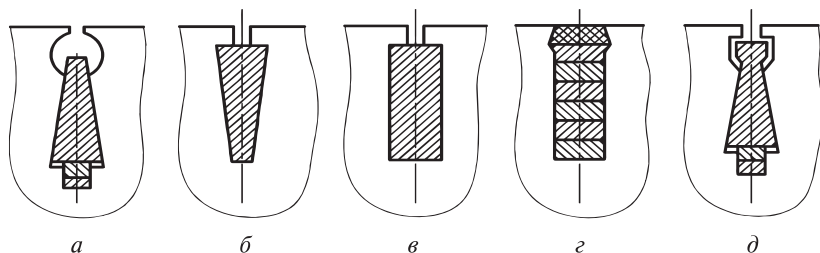


Рис. 2.9. Формы паза и конструкции стержня обмотки ротора АТД

Трапецеидальный стержень с узким основанием (вариант *а*) в сторону воздушного зазора позволяет надежно закрепить его в пазу с помощью специального клина. Однако при такой форме повышаются потери, вызванные вытеснением тока в узкую часть стержня.

Трапецеидальный стержень с широким основанием, обращенным к воздушному зазору (вариант *б*), существенно уменьшает добавочные потери, но усложняет его крепление в пазу. Есть опасность, что под воздействием центробежных сил появится зазор между стержнем и стенкой паза, что вызовет дополнительный нагрев обмотки.

Прямоугольный стержень упрощает процесс изготовления ротора (вариант *в*). Снижение добавочных потерь можно получить за счет выполнения его из нескольких проводников (вариант *г*).

При использовании составного стержня (вариант *д*) в случае надежного закрепления его в пазу можно снизить добавочные потери. Трапецеидальная часть, обращенная узкой стороной к зазору, обеспечивает надежную фиксацию стержня в пазу, а токи высших гармоник вытесняются в расширенную часть стержня.

Пакет сердечника ротора из шихтованных листов электротехнической стали, который набирается аналогично пакету статора, с двух сторон зажат нажимными шайбами и напрессован на вал двигателя или промежуточную втулку в зависимости от конструкции привода для передачи вращающего момента на колесную пару.

При частотном регулировании асинхронных двигателей пусковой момент по условию устойчивости имеет значительную величину и ограничивается температурой нагрева обмоток. Поэтому нет необходимости принимать дополнительные конструкторские решения для повышения пускового момента, в том числе за счет повышения сопротивления обмотки ротора или использования эффекта вытеснения.

В пазы сердечника ротора укладываются неизолированные медные стержни обмотки и в зависимости от принятого варианта конструкции закрепляются клиньями или ограничиваются беззазорной посадкой стержней. Стержни выполняются из меди специального проката. На выступающие из пазов концы стержней надеваются медные короткозамыкающие кольца, в которых про-

резаны пазы. Соединение короткозамыкающих колец со стержнями обмотки осуществляется сваркой или пайкой.

Для повышения механической (динамической) прочности на короткозамыкающие кольца насаживают с натягом специальные бандажные кольца, изготавливаемые из немагнитной стали или бериллиевой бронзы.

Теоретически для изготовления обмотки ротора АД мощностью до 300—400 кВт может быть использована заливка магнитопровода медью или алюминиевым сплавом. Выполненные исследования показывают, что в стержнях, полученных по такой технологии, имеют место неоднородности, что ведет к отличию в характеристиках различных экземпляров двигателей одного типа. Для обособленного (одномоторного) привода это может не иметь большого значения. Для многодвигательного тягового привода электроподвижного состава (ЭПС) это может привести к перераспределению нагрузок между осями и неполному использованию сцепного веса.

В конструкции ротора предусматривается установка специальных дисков, на которых крепятся балансировочные грузы.

В отличие от тяговых двигателей постоянного (пульсирующего) тока один из подшипников ротора помещается в специальную изолирующую капсулу для предотвращения протекания через подшипники токов, вызываемых аксиальной составляющей магнитного потока. Изолирующую капсулу обычно размещают со стороны двигателя, противоположной приводе, таким образом, чтобы осевые токи не имели гальванической цепи через вал, силовую передачу, корпус редуктора, раму тележки и корпус двигателя.

На характеристики АД большое влияние оказывает величина воздушного зазора. При уменьшении магнитного зазора уменьшается ток намагничивания, т.е. уменьшаются потери холостого хода P_d и увеличивается коэффициент мощности, но при этом возрастают потери от пространственных гармоник $P_{\text{осн}}$ (рис. 2.10). При конструировании асинхронного тягового двигателя нужно выбрать зазор, обеспечивающий минимум суммарных потерь.

Для системы управления асинхронными тяговыми двигателями необходим непрерывный контроль их частоты вращения (скольжения). Для этого на каждом двигателе устанавливаются специальные датчики. Они могут располагаться как внутри корпуса (см. поз. 6 рис. 2.4), так и снаружи (см. поз. 14 рис. 2.5).

Выбор числа пар полюсов. Тяговые двигатели должны иметь плавное регулирование от стопового режима до максимальной скорости, поэтому правильный выбор диапазона изменения частоты питающего напряжения оказывает существенное влияние на технико-экономические характеристики как двигателя, так и всего привода в целом. Принципиальным вопросом при этом является выбор числа пар полюсов p .

Асинхронный тяговый двигатель можно отнести к группе разнотеннополюсных электрических машин с равномерным основным воздушным зазором. У машин этой группы нормальная составляющая магнитной индукции в различных участках основного воздушного зазора (под различными полюсами) имеет разные знаки. Полюс асинхронного двигателя — это пространство, в котором во всех точках основного воздушного зазора нормальная составляющая магнитной индукции имеет один и тот же знак.

Число пар полюсов определяется схемой укладки проводников обмотки статора (распределением токов в пазах статора), оно равно количеству периодов нормальной составляющей индукции магнитного поля, приходящихся на полную длину воздушного зазора.

Из (2.5) следует, что частота вращения ротора АД практически пропорциональна частоте тока статора:

$$n_2 = n_1(1-s) = \frac{60f_1(1-s)}{p} \cong \frac{f_1}{p},$$

где f_1 — частота тока статора;
 p — число пар полюсов.

Отсюда часто делается вывод о том, что возможность свободного выбора номинальной частоты может быть использована для снижения массы двигателя. Теоретически это утверждение, безусловно, является справедливым. Однако нельзя забывать о реально существующих ограничениях по максимальной скорости подшип-

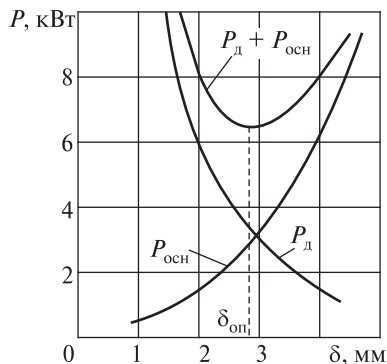


Рис. 2.10. Зависимость потерь холостого хода от величины воздушного зазора

ников, по передаточному отношению тягового редуктора и по величине потерь в статическом преобразователе, при которых можно обеспечить нормальную работу полупроводниковых приборов с применением реальных систем охлаждения.

Рассмотрим вопрос о том, как максимальная частота вращения и число пар полюсов АТД влияют на его массу при заданных параметрах электровоза и тягового двигателя (конструкционная скорость $V_{\max} = 110$ км/ч; осевая сила тяги $F_{\text{ось}} = 70$ кН; мощность ТЭД в часовом режиме $P_{\text{час ТЭД}} = 900$ кВт). Результаты расчетов приведены на рис. 2.11, кривые 1, 2, 3.

Из приведенных зависимостей следует, что:

– при увеличении максимальной частоты вращения от 2000 до 2600 об/мин (максимальная частота вращения современных коллекторных тяговых двигателей составляет 2000–2100 об/мин) при любом числе пар полюсов масса асинхронного двигателя G_a уменьшается примерно на 20 %;

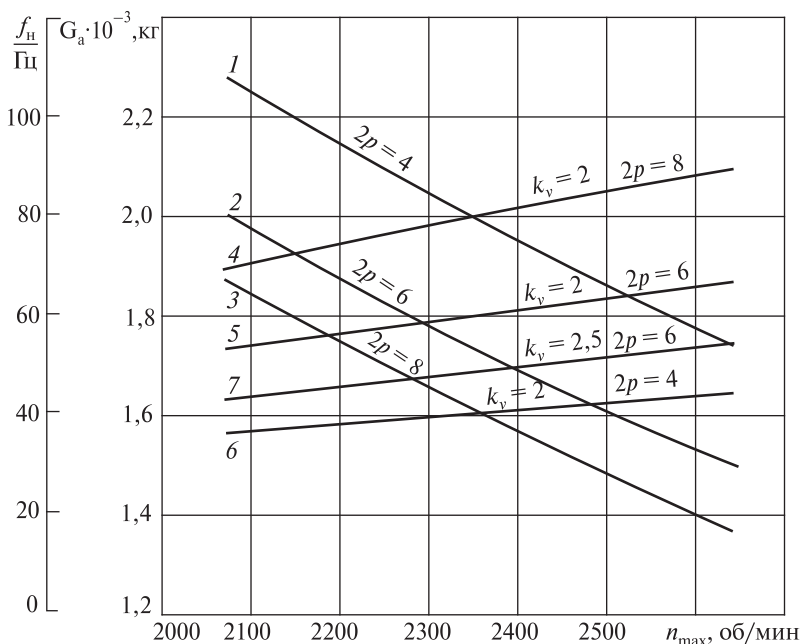


Рис. 2.11. Зависимость массы АТД и частоты питающего напряжения от частоты вращения $n_{\max}$

— при переходе от восьмиполюсной машины к шестиполюсной при одной и той же номинальной частоте вращения масса двигателя увеличивается на 8—9 %, а при переходе от восьмиполюсной к четырехполюсной — на 23—26 %.

Многополюсный двигатель имеет лучшие удельные показатели в основном за счет снижения веса магнитопроводов. КПД многополюсного электродвигателя будет несколько выше.

Другим показателем, влияющим на удельные характеристики АТД, являются номинальная и максимальная частоты тока, питающего тяговые двигатели.

Учитывая, что скольжение АТД составляет 1—2 %, в первом приближении можно считать, что

$$f_{\max} = \frac{pn_{\max}}{60}.$$

Соотношение максимальной и номинальной (длительной) частот вращения обычно лежит в пределах

$$k_V = \frac{n_{\max}}{n_{\text{дл}}} = 2,0 - 2,5.$$

На рис. 2.11 (кривые 4, 5, 6, 7) приведены зависимости частоты питающего напряжения f_n от $n_{\max}$ при различной полюсности тягового двигателя. При применении восьмиполюсного двигателя ($2p = 8$) частоты в диапазоне регулирования от $n_{\text{ном}}$ до $n_{\max}$ практически вдвое больше, чем при применении четырехполюсного двигателя ($2p = 4$).

Исследования, проведенные на стендах, показали, что в случае применения в качестве преобразователя четырехквадрантного выпрямителя и инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией (наиболее распространенный вариант преобразователя на магистральном железнодорожном подвижном составе переменного тока с асинхронным тяговым приводом) при увеличении частоты с 37 до 72 Гц потери в преобразователе в номинальном режиме увеличиваются на 37 %.

Увеличение потерь в статическом преобразователе при применении многополюсных тяговых двигателей заставляет применять более интенсивное охлаждение, в том числе испарительные системы и системы с циркуляцией жидкости.

По технико-экономическим соображениям максимальная частота тока, питающего тяговый двигатель, не должна быть больше 150—160 Гц с учетом реальных характеристик современных полупроводниковых приборов. Если при этом ограничить по условиям работы подшипников максимальную частоту вращения тяговых двигателей величиной 3000 об/мин, то наибольшее возможное число пар полюсов АД будет равно

$$p \leq 60 \times (150 - 160) / 3000 \leq 3,0 - 3,2,$$

т.е. практически по условиям работы преобразователя асинхронный тяговый двигатель электровоза должен иметь не более трех пар полюсов. В силу этих обстоятельств на многих типах электровозов, создаваемых за рубежом и в России, нашли применение шестиполюсные АД ($2p = 6$). В этом случае частота питающего напряжения тягового двигателя в номинальном режиме лежит в пределах 45—65 Гц.

Характеристики АД отечественных электровозов приведены в табл. 2.1.

Устройство асинхронного тягового двигателя НТА-1200. «Типаж» перспективного тягового подвижного состава предусматривает применение асинхронных тяговых двигателей с мощностью на ось 1000 кВт и более на электровозах как постоянного, так и переменного тока. Поэтому выбор оптимальных вариантов конструкций АД целесообразно вести, взяв за основу двигатель НТА-1200. Он был создан как универсальный и установлен впервые на электровозе двойного питания ЭП10.

Этот двигатель (или его усовершенствованные варианты) будут впоследствии применяться на четырехосных и шестиосных электровозах с асинхронным тяговым приводом. На рис. 2.12 показан внешний вид АД НТА-1200, его рабочие характеристики представлены на рис. 2.13.

Подвешивание двигателя на тележке электровоза —

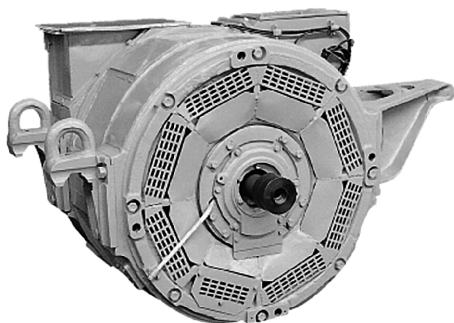


Рис. 2.12. Внешний вид асинхронного тягового двигателя НТА-1200

Таблица 2.1

Характеристики АТД отечественных электровозов

Параметр	Тип двигателя						
	НБ 602	НБ 607	НБ 609	НТА 1200	ДТА 1200А	ДТА 1050	НТА 350
Мощность часового режима, кВт	950	950	970	1200	1200	1050	350
Сила тяги часового режима, тс	4,8	6,0	6,7	5,3	6,5	7,5	1,8
Напряжение линейное, В	1300	1300	2100	2183	2183	2000	1100
Ток часового режима фазный, А	700	535	335	455	390	360	240
Частота вращения в часовом режиме, об/мин	1395	890	860	1305	1766	975	1440
КПД	0,945	0,939	0,932	0,952	0,96	0,953	0,93
Коэффициент мощности	0,835	0,835	0,854	0,852	0,85	0,9	0,81
Число пар полюсов	4	3	3	3	3	3	3
Частота питающего напряжения в часовом режиме, Гц	94	45	43,7	65,8	68,9	49,3	72,6
Вентиляция	Независимая						
Расход охлаждающего воздуха, м ³ /м	120	110	90	90	90	90	—
Изоляция обмотки статора	F	F	F	200 °С	200 °С	200 °С	Н
Обмотка ротора	Короткозамкнутая медная						
Подвешивание	Опорно-осевое			Опорно-рамное			
Тип питающего инвертора	Автономный инвертор напряжения						Авто- номный инвертор тока
Масса, кг	3850	3840	4000	2600	2250	3350	1420
Удельная масса, кг/кВт	4,04	4,04	4,12	2,17	1,88	3,19	4,05

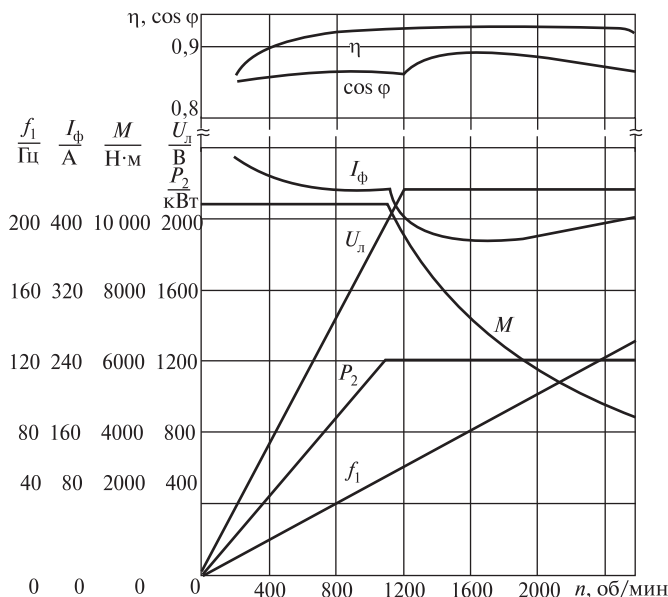


Рис. 2.13. Рабочие характеристики АТД НТА-1200: f_1 — частота питающего напряжения; P_2 — мощность; M — момент на валу; $U_{\text{л}}$ — напряжение линейное; I_{ϕ} — ток фазный; η — КПД

опорно-рамное с индивидуальным приводом каждой колесной пары через редуктор с передаточным отношением $85:23 = 3,6956$ при торцевом модуле зубчатой передачи $m = 11$ мм. Расчетная централь $\text{Ц} = 602$ мм.

Тяговый электродвигатель рассчитан для работы в условиях эксплуатации при воздействии механических факторов внешней среды в части вибрационных и ударных нагрузок в соответствии с ГОСТ 2582—81 для группы М26 по ГОСТ 17516.1—90. Климатическое исполнение У1 по ГОСТ 15150—69.

Тяговый электродвигатель НТА-1200 является трехфазной асинхронной электрической машиной бескорпусного исполнения с короткозамкнутым ротором, независимой вентиляцией и регулируемой частотой вращения, что обеспечивается изменением частоты питающего напряжения.

Технические данные электродвигателя НТА-1200 при питании синусоидальным напряжением приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

**Технические данные электродвигателя НТА-1200 при питании
синусоидальным напряжением**

Параметр	Режим работы	
	Часовой	Продолжительный
Мощность, кВт	1200	1170
Напряжение линейное, В	2183	
Ток фазы статора, А	385	375
Частота вращения, об/мин	1295	
Вращающий момент, кН·м	8,853	8,629
Частота тока, Гц	65,4	
КПД, %	95,7	95,8
$\cos \varphi$	0,861	
Вентиляция	Независимая	
Количество охлаждающего воздуха, м ³ /мин	90	
Потери полного давления воздуха, Па	1700	
Масса, кг	2600	
Удельная масса, кг/ кВт	2,17	

Параметры Т-образной схемы замещения (см. рис. 2.2) для двигателя НТА-1200 при 20 °С таковы: $r_1 = 0,0298$ Ом, $x_{\sigma 1} = 0,553$ Ом, $r_2' = 0,0255$ Ом, $x_{\sigma 2}' = 0,4394$ Ом, $x_m = 18,16$ Ом.

На рис. 2.14 и 2.15 показаны продольный и поперечный разрезы двигателя НТА-1200.

Конструктивно электродвигатель состоит из статора 8, ротора 9, подшипниковых щитов 7 и 14, торсионного вала 1 с зубчатой полумуфтой 23 (см. рис. 2.14).

Статор бескорпусного исполнения содержит пакет магнитопровода, который в спрессованном состоянии зажат между двумя корпусами коробчатой формы, соединенными между собой сваркой шестью стальными накладками сечением 25×200 мм, имеющими длину, равную длине шихтованного сердечника. Корпусы являются несущей основой конструкции электродвигателя. На них выполнены «замки» для установки съемных кронштейнов 3, 4 (рис. 2.15) крепления электродвигателя к раме тележки, резьбовые отверстия А (см. рис. 2.14) для размещения транспортировочных рымов, отверстия Б для слива конденсата и горловины для запрессовки подшипниковых щитов 7, 14.

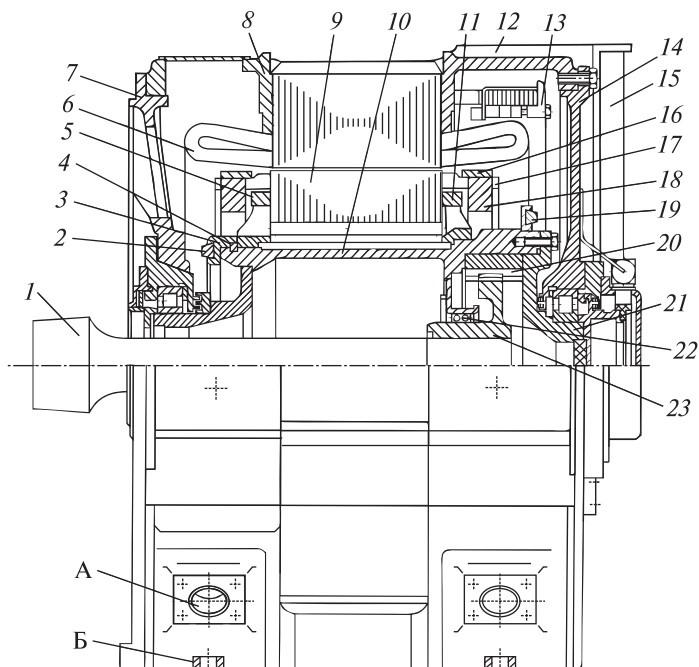


Рис. 2.14. Продольный разрез АД НТА-1200: 1 — торсионный вал; 2 — балансирующие грузы; 3 — удерживающее кольцо; 4 — кольцевая шпонка; 5, 11 — нажимные шайбы; 6 — обмотка статора; 7, 14 — подшипниковые щиты; 8 — статор; 9 — ротор; 10 — полый вал; 12 — вентиляционный короб; 13 — изоляционные пальцы; 15 — кожух; 16 — бандажное кольцо; 17 — стержень ротора; 18 — короткозамыкающее кольцо; 19 — кольцо; 20 — зубчатый венец; 21 — съемная втулка; 22 — уплотнительная манжета; 23 — зубчатая полумуфта; А — резьбовые отверстия; Б — отверстия для слива конденсата

Одновременно корпуса являются камерами для размещения лобовых частей обмотки статора *б* и воздуховодами для равномерного распределения вентилирующего воздуха по поперечному сечению тягового электродвигателя.

Трехфазная обмотка статора (рис. 2.16) состоит из двух независимых обмоток с общим числом полюсов $2p = 6$. Каждая фаза обмотки состоит из трех параллельных ветвей ($a = 3$). При этом каждая из обмоток собрана из фазных катушечных групп одной условной полярности. Обмотка 1 с катушками условно южной по-

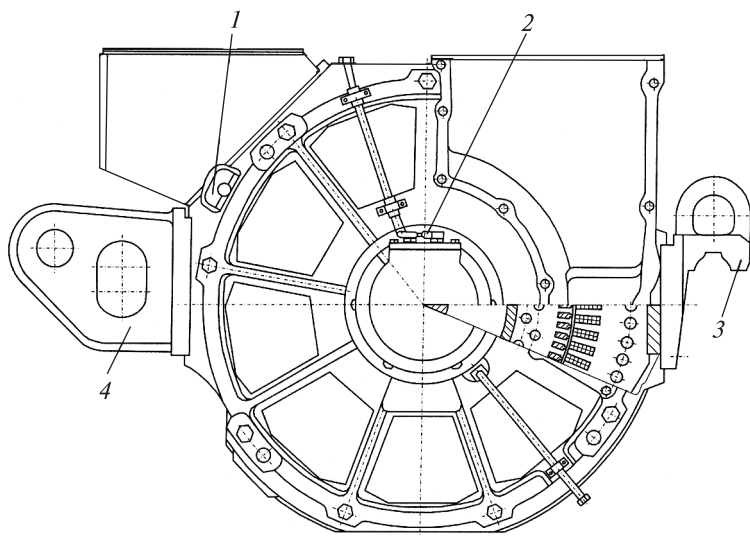


Рис. 2.15. Поперечный разрез АТД НТА-1200: 1, 2 — датчики температуры и частоты вращения; 3, 4 — кронштейны для крепления электродвигателя

лярности соединена в «звезду» без вывода нулевой точки. Обмотка 2 с катушками условно северной полярности разомкнута и имеет свободные выводы начала и конца в каждой фазе.

Такое исполнение статорной обмотки при некотором конструктивном усложнении ее выводов позволяет за счет внешней коммутации выводов в схеме электровоза соединять статорную обмотку на тяговом электродвигателе с включением фаз первой и второй обмоток последовательно в одну «звезду» или иметь две параллель-

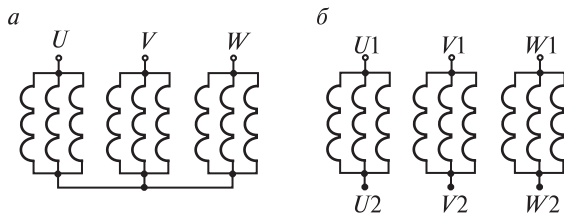


Рис. 2.16. Схема соединений обмотки статора в фазы АТД НТА-1200:
а — обмотка 1; б — обмотка 2

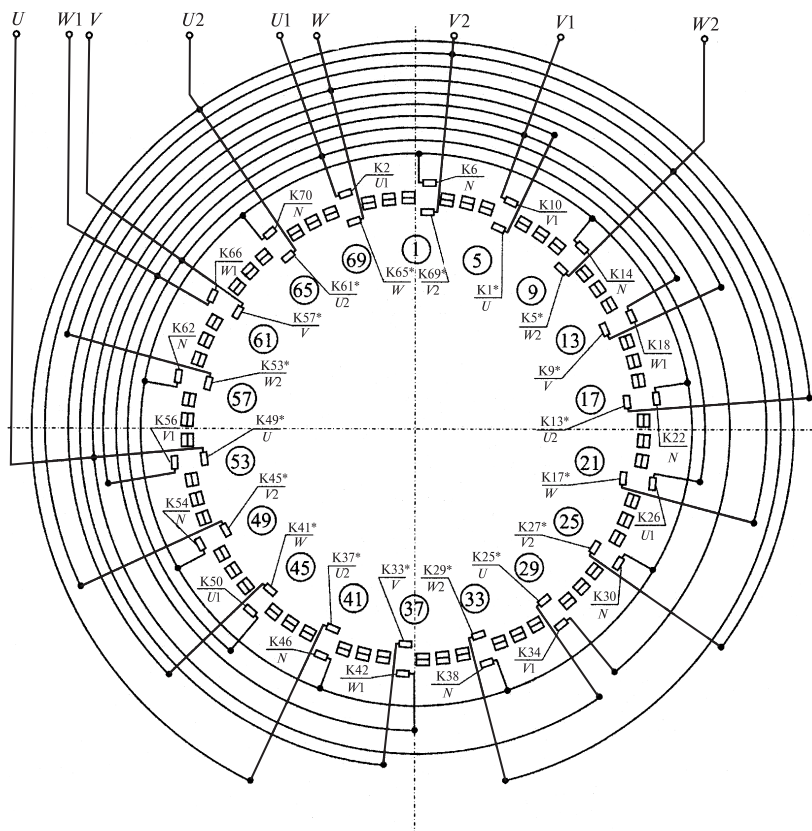
ные «звезды» с их независимым питанием, что продиктовано особенностями схемы питания электровоза ЭП10 при работе либо от контактной сети переменного тока (25 кВ, 50 Гц), либо от контактной сети постоянного тока (3 кВ).

Конструктивно обмотка статора состоит из 72 жестких шаблонных катушек, уложенных в открытые пазы статора и закрепленных клиньями из профильного стеклопластика. Катушки наматываются из медного изолированного прямоугольного провода марки ППИПК-1 с размерами $2,24 \times 5,3/2,55 \times 5,63$ мм (в два параллельных провода). Число витков в катушке равно 9. Корпусная изоляция катушек в пазовой части состоит из двух слоев с перекрытием в половину нахлеста и одного слоя с перекрытием $2/3$ ширины ленты стеклослюдинитовой «Samikarog 366.86» — $0,11 \times 20$ мм и одного слоя стеклоленты ЛЭС $0,1 \times 20$ мм, уложенной встык. В лобовых частях — три слоя в половину нахлеста стеклослюдинитовой ленты и один слой ленты ЛЭС с аналогичным перекрытием.

Пазы статора перед укладкой катушек изолируются гильзами из синтофлекса 828 толщиной 0,15 и 0,24 мм.

После укладки и расклиновки катушки соединяются между собой в катушечные группы и фазы шинными переемычками (рис. 2.17) методом пайки припоем ПСР-25Ф. Соединения изолируются стеклослюдинитовой лентой ЛСЭК-5-СПл $0,1 \times 20$ мм и стеклолентой ЛЭС $0,1 \times 20$ мм. Шинные переемычки выполнены из медной ленты ДПРНМ сечением $1,81 \times 19,5$ мм и изолированы шестью слоями стеклослюдинитовой ленты ЛСЭК-5-СПл $0,1 \times 20$ мм в половину нахлеста и одним слоем в половину нахлеста стеклоленты ЛЭС $0,1 \times 20$ мм. Комплект шинных переемычек размещается на жестких скобах, привариваемых изнутри к корпусу статора со стороны выводов, и закрепляется специальными изоляционными пальцами 8 (см. рис. 2.14), выполненными из прессматериала АГ-4В. К фазным шинным переемычкам припаяны гибкие кабельные выводы с опрессованными и соответственно промаркированными наконечниками.

Коробка выводов. Наконечники выводных кабелей 1 (рис. 2.18) крепятся на кронштейнах 2 опорных изоляторов 3. Опорные изоляторы крепятся к изоляционной панели 4, устанавливаемой в коробке выводов. Коробка выводов закрывается крышкой 6 из стеклопластика. Обмотанный статор вместе с шинными переемыч-



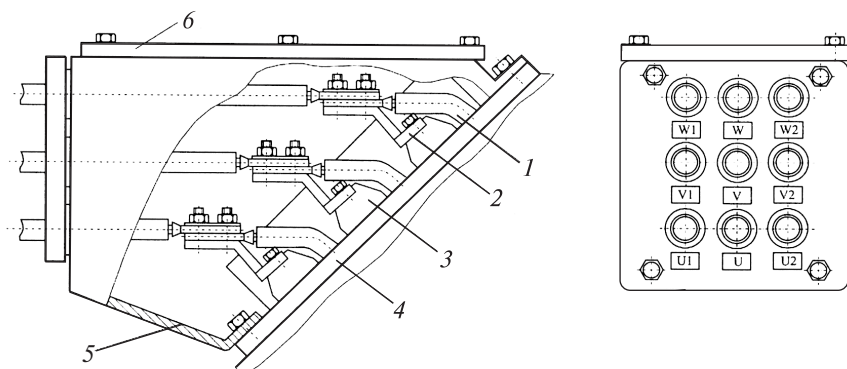


Рис. 2.18. Коробка выводов АТД НТА-1200: 1 — выводной кабель; 2 — кронштейн; 3 — опорный изолятор; 4 — изоляционная панель; 5 — корпус; 6 — крышка

Пакет магнитопровода ротора, имеющий вентиляционные отверстия и пазы для укладки стержней 19 роторной обмотки, напрессован на полый вал 14, представляющий собой втулку, в которую проходит торсионный вал 5.

Торсионный вал 5 (см. рис. 2.14) с напрессованной зубчатой полумуфтой 6 сочленяется с зубчатым венцом 15 муфты привода, который в свою очередь запрессован в полость втулки, образованную с одной стороны перегородкой с сальником (две уплотнительные манжеты 16), с другой стороны — съемной втулкой 17, служащей второй подшипниковой опорой ротора.

Сальниковые манжеты 16 плотно прилегают к торсионному валу 5 и, таким образом, создается масляная камера зубчатой полумуфты 6, в которую заливается 2,5 кг осевого масла «ОС-3» с добавлением 0,052 кг порошка дисульфида молибдена.

При избыточном заполнении масляной камеры излишки масла вследствие большого перекаса торсионного вала могут в процессе монтажа электродвигателя с колесной парой истекать через манжеты во внутреннюю полость втулки ротора по торсионному валу до нормального уровня в камере муфты, соответствующего при невращающемся роторе уровню расположения манжет.

В связи с этим наличие подтеков масла на торсионном валу не является признаком ненормальной работы электродвигателя.

Кольцо 18 (см. рис. 2.14) с канавкой для балансировочных грузов 13 напрессовывается на втулку полого вала 14 и приваривается к нему после укладки и пайки стержней обмотки ротора 19.

Кроме того, на втулку полого вала напрессованы детали лабиринтно-щелевого уплотнения подшипников и внутренние обоймы подшипников.

Роторная короткозамкнутая обмотка выполнена 88 медными прямоугольными стержнями 19 сечением 9,0×25 мм, соединенными по торцам медными короткозамыкающими кольцами 20 пайкой серебросодержащим припоем ПСР-25Ф. В средней части стержни защемлены в пакете железа ротора методом керновки. Отсутствие центрирующих элементов короткозамыкающих колец, а также наличие по краям пакета железа листов ротора с расширенными размерами паза позволяет стержням свободно перемещаться при тепловых деформациях как в аксиальном направлении от места керновки, так и в радиальном направлении в консольной части от места фиксации в пазу.

Для обеспечения прочности короткозамыкающих колец и соединений со стержнями на специально проточенные поверхности короткозамыкающих колец напрессованы бандажные кольца 21, которые выполнены из специальной высокопрочной немагнитной стали. Посадка колец осуществлена с предварительным нагревом последних до температуры 280 °С.

Для исключения появления дополнительного шума в работающем электродвигателе от вибрации листов в зубцовой зоне магнитопровода ротор пропитан в кремнийорганическом лаке КО-916К.

Окончательно собранный ротор подвергается динамической балансировке с допустимым остаточным дисбалансом не более 90 г·см на каждую сторону.

Подшипниковые щиты тягового электродвигателя выполняют роль опоры ротора и изготовлены из стального литья в виде дисков.

В средней части щиты (рис. 2.19) имеют гнезда для посадки наружных колец подшипников 5, 11 и размещения деталей уплотнения подшипниковых камер (крышки подшипников 2, 12, 14), дозирующие кольца 1, 15; лабиринтные кольца 6, 10), а по наружному контуру утолщения с фланцами для запрессовки и крепления их болтами М20 в корпусах статора. Во фланцах имеется по че-

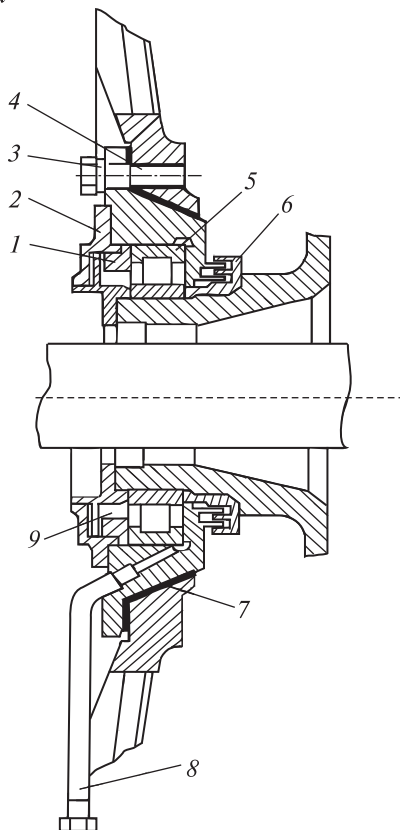
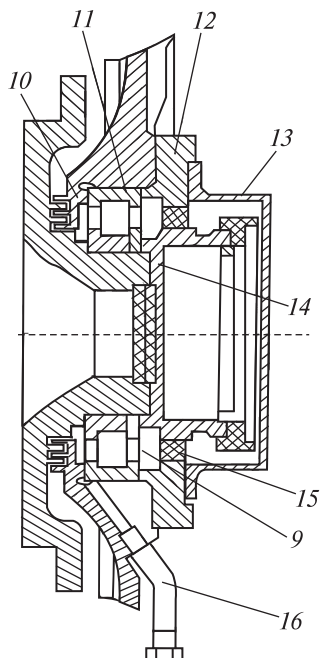
a*б*

Рис. 2.19. Система уплотнения подшипников и подвода смазки АТД НТА-1200: *a* и *б* — малый и большой подшипниковые щиты; 1, 15 — дозирующие кольца; 2, 12, 14 — крышки подшипников; 3 — изоляционная прокладка; 4 — изоляционная втулка; 5, 11 — подшипники; 6, 10 — лабиринтные кольца; 7 — миканитовая манжета; 8, 16 — трубки подачи смазки; 9 — камера сбора отработанной смазки; 13 — крышка

тыре отверстия с резьбой М30 для выжимных болтов, с помощью которых щиты выпрессовываются из остова при разборке тягового электродвигателя. С наружной стороны на щитах установлены трубки 8, 16 для подачи смазки в подшипники и камеры 9 для сбора отработанной смазки.

С целью защиты подшипников от протекания по ним «подшипниковых токов», возникающих от магнитной несимметрии машины, подшипниковый щит со стороны выхода конца торсионного вала выполнен с изолированной ступичной частью. Изолировка осуществляется формованной миканитовой манжетой 7, изоляционными втулками 4 и изоляционными прокладками 3.

В электродвигателе НТА-1200 применены специальные подшипники качения, рассчитанные на повышенную частоту вращения: со стороны привода роликовый подшипник 80-32134М2, а со стороны, противоположной приводу, роликовый фиксирующий подшипник 80-92228М1.

Подшипниковые камеры заполняются специальной смазкой «Буксол», которая закладывается при сборке тягового электродвигателя.

Для реализации частотного управления на электродвигателе установлен бесконтактный датчик частоты вращения (рис. 2.20). Вращающаяся часть 2 датчика закреплена на втулке ротора со стороны зубчатой муфты, а неподвижная ответная часть 1 — на крышке подшипникового щита. Специальными кабелями и штепсельными разъемами датчик соединяется со схемой управления электровоза.

Для контроля теплового состояния тяговые электродвигатели оснащены датчиками температуры. Датчик (рис. 2.21) представляет собой два терморезистора в виде капсул 1, установленных в специальные гнезда в одном из зубцов сердечника статора 2. Специальным кабелем 4 и штепсельным разъемом 5 датчик соединяется

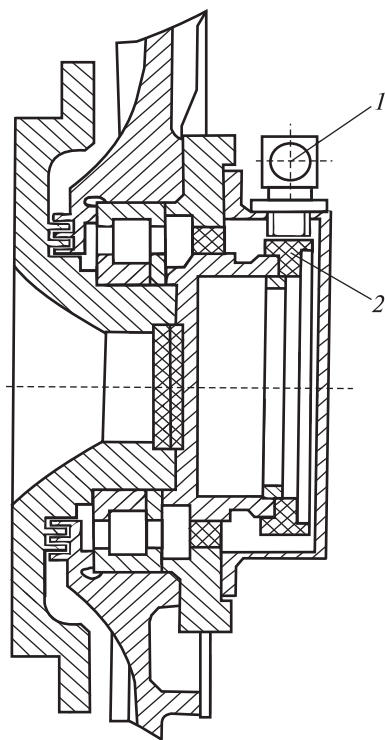


Рис. 2.20. Установка датчика частоты вращения АТД НТА-1200: 1, 2 — неподвижная и подвижная части датчика

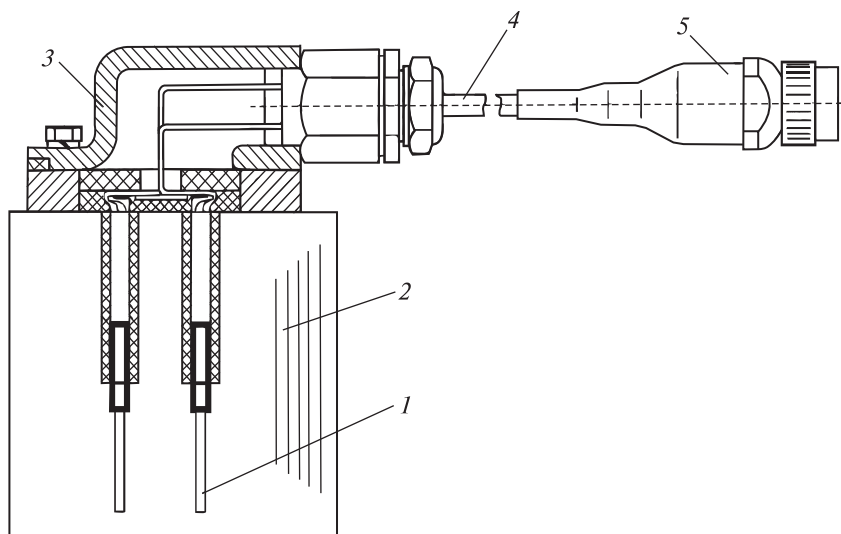


Рис. 2.21. Установка датчиков температуры на АТД НТА-1200: 1 — капсула с терморезисторами; 2 — зубец сердечника статора; 3 — уплотнительная крышка; 4 — кабель; 5 — штепсельный разъем;

со схемой управления электровоза. Место пайки терморезисторов к выводному кабелю уплотнено специальной уплотнительной крышкой 3.

Вентиляция. Тяговый электродвигатель НТА-1200 имеет независимую принудительную систему вентиляции. Охлаждающий воздух подается (см. рис. 2.14) в вентиляционный патрубок, который состоит из металлического короба 22, установленного на боковине статора со стороны зубчатой муфты, и стеклопластового кожуха 23, закрепленного на подшипниковом щите. Воздух выходит из электродвигателя через торцевые окна в подшипниковом щите со стороны выходного конца торсионного вала.

2.2.2. Особенности конструкции АТД тепловозов

Особенности конструкции АТД тепловозов зависят от условий их эксплуатации в составе колесно-моторного блока, которые определяют основные требования к конструктивному исполнению и массогабаритным характеристикам электродвигателей.

Конструктивное исполнение АТД грузовых тепловозов предусматривает консольное расположение шестерни на валу двигателя. Длина остова двигателя и его поперечное сечение должны обеспечивать вписывание в колесно-моторный блок с диаметром колеса тепловоза 1050 мм.

На экспериментальном магистральном тепловозе ТЭ120 был установлен АТД ЭД-900У1, внешний вид которого показан на рис. 2.22, продольный разрез — на рис. 2.23. Электродвигатель шестиполусный, с принудительной нагнетательной вентиляцией, с изоляцией статорных обмоток класса нагревостойкости «Н». Короткозамкнутая обмотка ротора литая алюминиевая. Основные параметры АТД ЭД-900У1 представлены в табл. 2.3.

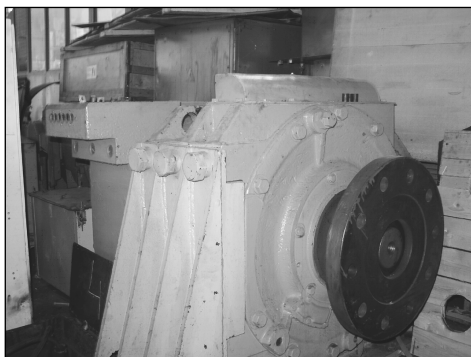


Рис. 2.22. Внешний вид асинхронного тягового электродвигателя ЭД-900У1

Асинхронные тяговые двигатели опытных образцов тепловозов ТЭМ21-001 и 2ТЭ25А-001 имеют ряд конструктивных отличий от электродвигателя ЭД-900У1.

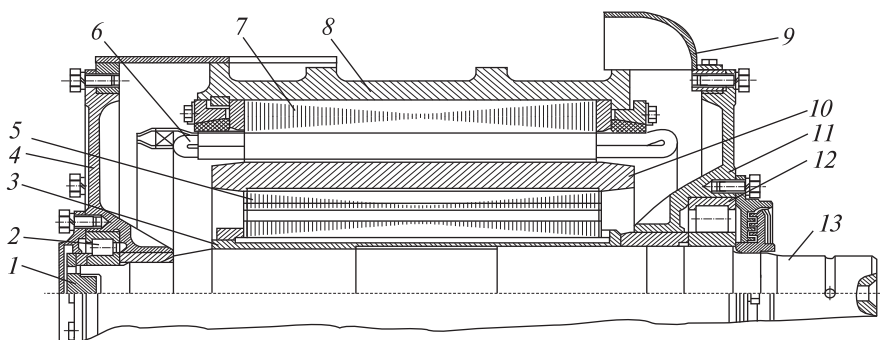


Рис. 2.23. Продольный разрез АТД ЭД-900У1: 1 — шайба; 2, 12 — роликовый подшипник; 3 — втулка; 4, 11 — подшипниковый щит; 5 — сердечник ротора; 6 — обмотка статора; 7 — сердечник статора; 8 — корпус; 9 — кожух защитный; 10 — короткозамкнутая обмотка ротора; 13 — вал

Характеристики АТД отечественных тепловозов

Параметр \ Тип двигателя	ЭД-900У1	ДАТ-305-2230 УХЛ1	ДАТ-350-6 УХЛ1
Мощность на валу, кВт	380	305	350
Напряжение линейное, В	720/960	675/1000	650/1410
Ток фазы, А	413/290	320/195	420/165
Ток фазы при трогании, А, не более	550	320	470
Частота тока статора максимальная, Гц	120	113	115
Частота вращения (синхронная) максимальная, об/мин	2400	2230	2370
Частота вращения, об/мин	483/2330	313/2165	361/2300
Максимальный вращающий момент на валу при трогании, Нм	10 582	9770	10 493
Мощность в тормозном режиме, кВт	380	350	500
КПД, %	91,0/93,5	91,0	92,3
Напор охлаждающего воздуха, Па	2550	1500	1600
Расход охлаждающего воздуха, м ³ /с	1,25	0,8	1,2
Масса, кг	2300	2500	2350
Удельная масса, кг/кВт	6,05	8,19	6,71

Асинхронный тяговый электродвигатель **ДАТ-305-2230 УХЛ1** для маневрового тепловоза ТЭМ21-001 имеет опорно-осевое исполнение с подшипниками скольжения (рис. 2.24, 2.25).

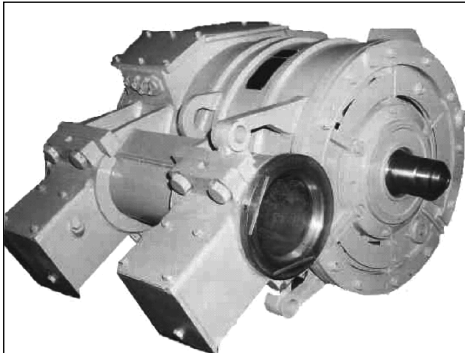


Рис. 2.24. Внешний вид асинхронного тягового электродвигателя ДАТ-305-2230 УХЛ1

В отличие от электродвигателя ЭД-900У1, подшипниковый щит электродвигателя ДАТ-305-2230 УХЛ1 выполнен с окнами со стороны привода для организации осевого выхода охлаждающего воздуха из двигателя. Окна имеют жалюзи. Электродвигатель ДАТ-305-2230 УХЛ1 — также шестиполусный, с принудительной нагнетательной вентиляцией, с изоляцией статорных обмоток класса

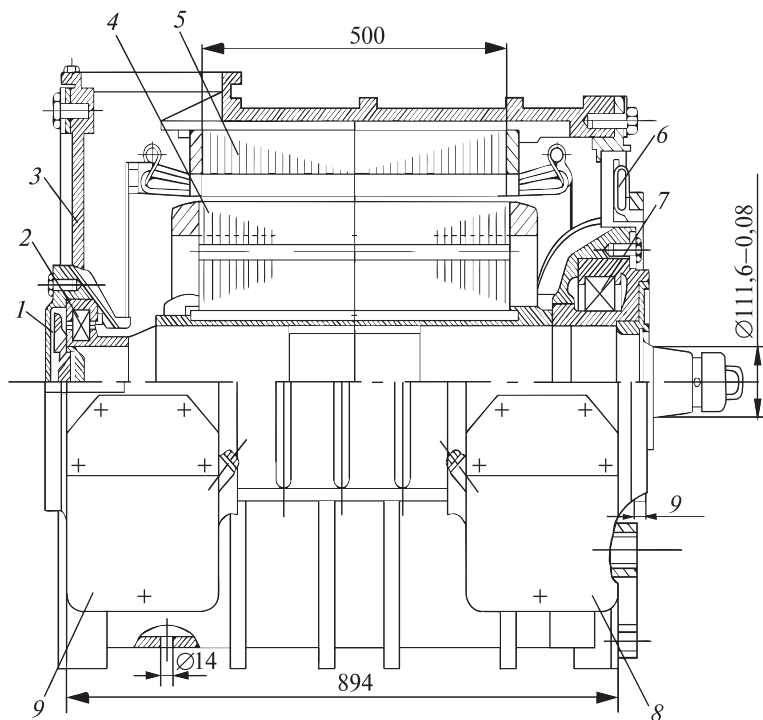


Рис. 2.25. Продольный разрез асинхронного тягового электродвигателя ДАТ-305-2230 УХЛ1: 1 — колесо измерительное зубчатое; 2, 7 — подшипник качения; 3, 6 — подшипниковый щит; 4 — ротор; 5 — статор; 8 — подшипник моторно-осевой; 9 — корпус

нагревостойкости «Н», с короткозамкнутой литой алюминиевой обмоткой ротора.

На торце вала ротора со стороны, противоположной приводу, установлено измерительное зубчатое колесо датчика частоты вращения индуктивного типа.

Основные параметры электродвигателя ДАТ-305-2230 УХЛ1 представлены в табл. 2.3.

Асинхронный тяговый электродвигатель **ДАТ-350-6 УХЛ1** для магистрального грузового тепловоза 2ТЭ25А-001 (рис. 2.26, 2.27) изначально создавался для опорно-осевого подвешивания с использованием подшипников качения.

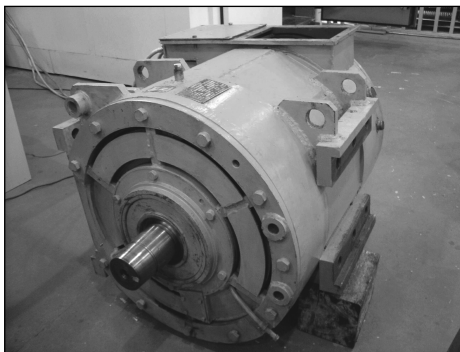


Рис. 2.26. Внешний вид асинхронного тягового электродвигателя ДАТ-350-6 УХЛ1

Существенным отличием ДАТ-350-6 от двигателей ЭД-900У1 и ДАТ-305-2230 является бескорпусная конструкция статора. Пакет железа статора спрессовывается между двумя сварными боковинами. Железо статора фиксируется в сжатом состоянии запорными элементами.

В специально выштампованные в листах статора пазы установлены стяжные планки, которые приварены к торцам боковин и вдоль

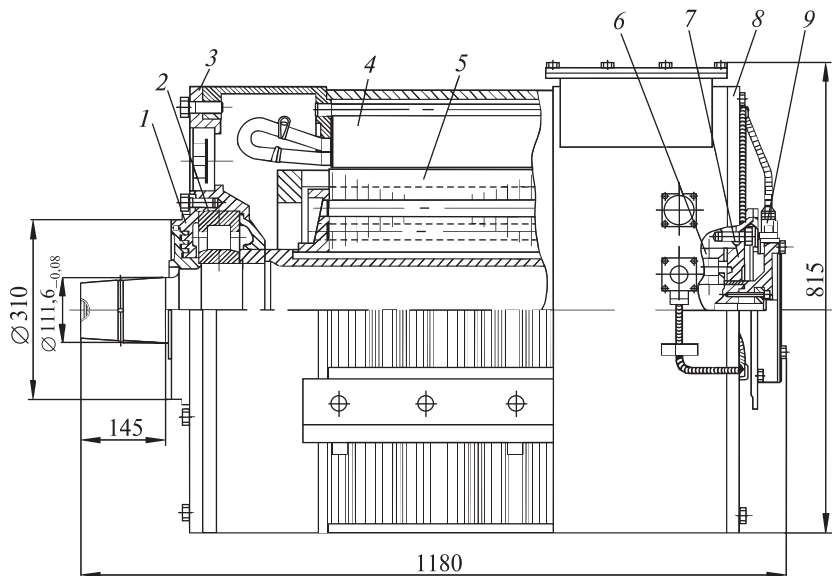


Рис. 2.27. Продольный разрез асинхронного тягового электродвигателя ДАТ-350-6 УХЛ1: 1 — крышка подшипника; 2, 6 — подшипники роликовые; 3, 8 — подшипниковые щиты; 4 — статор; 5 — ротор; 7 — крышка подшипника; 9 — датчик частоты вращения

железа статора. К боковинам с двух сторон приварены балки, являющиеся несущими элементами крепления двигателя в колесном моторном блоке тепловоза.

Электродвигатель ДАТ-350-6 УХЛ1 — шестиполусный, с принудительной нагнетательной вентиляцией, с изоляцией класса нагревостойкости «Н» статорных обмоток. Короткозамкнутая обмотка ротора выполнена из медных стержней, концы которых замкнуты накоротко медными кольцами и соединены пайкой.

Основные параметры асинхронного тягового двигателя ДАТ-350-6 УХЛ1 представлены в табл. 2.3.

Для возможности эффективного регулирования режимов работы двигателей типа ДАТ-350-6 УХЛ1 они оборудованы датчиками частоты вращения ротора и контроля теплового состояния статора.

Датчики температуры позволяют обеспечить требуемое непрерывное регулирование производительности вентилятора АД при помощи плавно регулируемого вспомогательного асинхронного электропривода. Сигналы датчиков частоты вращения ротора и контроля теплового состояния статора используются также для диагностических целей.

Параметры схемы замещения (см. рис. 2.2) асинхронных тяговых электродвигателей ЭД-900У1, ДАТ-305-2230 УХЛ1, ДАТ-350-6 УХЛ1 при номинальной мощности в продолжительном режиме работы и температуре 20 °С приведены в табл. 2.4.

Характеристики холостого хода рассмотренных выше АД в виде зависимостей магнитного потока Φ от тока представлены на рис. 2.28.

Таблица 2.4

Параметры схемы замещения асинхронных ТЭД, приведенной на рис 2.2

Параметр	ЭД-900У1	ДАТ-305-2230 УХЛ1	ДАТ-350-6 УХЛ1
r_1 , Ом	0,022	0,0485	0,0375
r_2' , Ом	0,0211	0,0355	0,0312
x_1 , Ом	0,104	0,0727	0,1997
x_2' , Ом	0,109	0,058	0,1792
x_m , Ом	2,116	4,238	4,148

Поскольку производство тепловозов с асинхронными тяговыми двигателями в России находится на стадии освоения, технические требования к ним следует рассматривать в контексте требований к

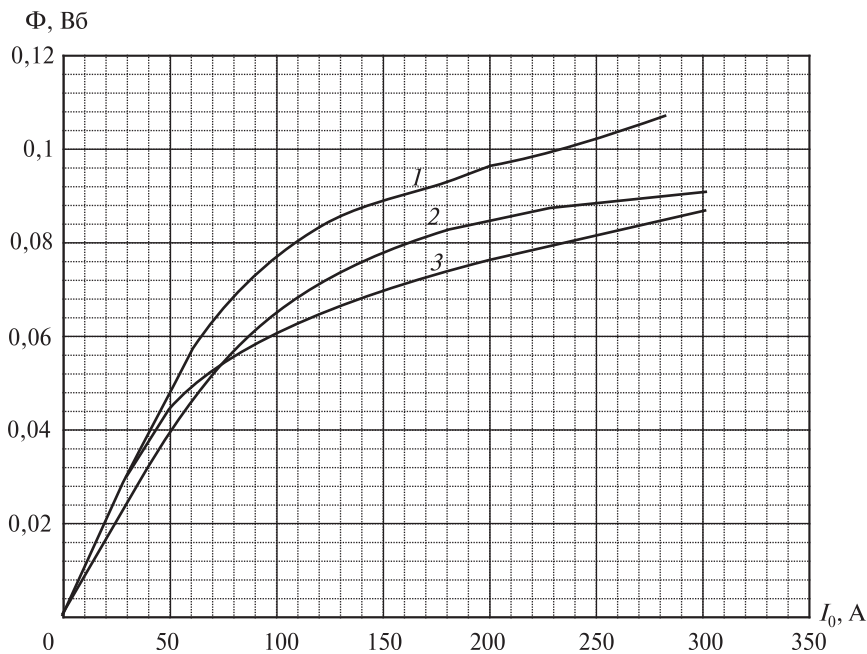


Рис. 2.28. Кривые зависимости магнитного потока от тока холостого хода тяговых электродвигателей: 1 — ДАТ-305-2230 УХЛ; 2 — ЭД-900У1; 3 — ДАТ-350-6 УХЛ1

перспективным тепловозам, которые будут оснащены этими двигателями.

В колесно-моторных блоках грузовых и маневровых локомотивов, согласно требованиям «Типажа», будет применяться опорно-осевое подвешивание тягового электродвигателя. В качестве моторно-осевых подшипников магистральных и маневровых локомотивов предполагается использование подшипников качения, обеспечивающих пробег до капитального ремонта локомотивов.

Для передачи вращающего момента тягового двигателя к колесной паре на тепловозах в обозримой перспективе сохранится односторонняя прямозубая передача, подразумевающая исполнение двигателя с одним приводящим концом вала, что является традиционным для отечественного тепловозостроения.

На пассажирских тепловозах предполагается опорно-рамное подвешивание тягового двигателя при сохранении максимальной унификации его конструкции с тяговыми двигателями грузовых и маневровых тепловозов.

Тяговые электродвигатели перспективных тепловозов должны быть рассчитаны на мощность до 500 кВт, обеспечивать вращающий момент при трогании на уровне 10—12 кН·м, допускать работу с частотой вращения ротора 2300—3000 об/мин, иметь расчетный КПД 92—94 % и массу не более 2500 кг. Срок службы тяговых электродвигателей тепловозов предполагается на уровне 40 лет.

Повышение надежности и срока службы АТД должно обеспечиваться применением современных изоляционных материалов класса нагревостойкости не ниже «Н»; при этом ресурс систем изоляции должен быть не менее 20 лет (до капитального ремонта АТД с заменой изоляции).

Применяемая изоляция статорной обмотки должна быть выполнена с учетом условий питания АТД от тягового статического преобразователя частоты, в том числе в режиме ШИМ-модуляции.

Кроме того, изоляция АТД тепловозов должна быть влагостойкой, стойкой к парам масла и дизельного топлива, должна обеспечивать надежную работу электродвигателя при резких перепадах температуры окружающей среды (для России — в течение двух часов на 30 °С). Влага, образующаяся при таких перепадах температуры, не должна проникать вглубь изоляции и должна удаляться обдувом охлаждающего воздуха. Вентиляция АТД — принудительная нагнетательная.

Так как для асинхронных тяговых электродвигателей наиболее изнашиваемым узлом являются подшипники, особое внимание будет уделяться повышению их ресурса.

2.3. Условия работы тяговых двигателей подвижного состава железных дорог. Технические требования

Тяговые двигатели железнодорожного подвижного состава работают в гораздо более тяжелых условиях по сравнению с их аналогами, используемыми в стационарных устройствах. Это вызвано тем, что они размещаются в ограниченном пространстве, определяемом в основном диаметром колесной пары и шириной колеи. На тяговый двигатель воздействуют: климатические условия, ме-

ханические нагрузки, частые изменения режимов работы и другие факторы.

Климатические условия. Локомотивы российских железных дорог и их оборудование предназначены для эксплуатации в различных климатических зонах. Учитывая, что в эксплуатации часто возникает необходимость передислокации локомотивов из одной климатической зоны в другую, они имеют исполнение, соответствующее наиболее тяжелым условиям эксплуатации в зоне умеренно-холодного климата (УХЛ). При этом тяговые двигатели и другое электрическое оборудование рассчитываются на работу при температуре окружающего воздуха от -60 до $+40$ °С и эксплуатацию в теплых влажных, жарких сухих и очень жарких сухих климатических районах.

Работа тяговых двигателей при высоких температурах ведет к ускоренному старению изоляционных материалов, изменяет характеристики смазочных материалов (табл. 2.5). Низкие температуры ухудшают физико-механические свойства материалов, примененных в конструкции тяговых двигателей. При низких температурах увеличивается жесткость рельсового пути и количество дефектов рельсов, что ведет к повышению динамических воздействий на электрооборудование, в том числе на тяговые двигатели, особенно с опорно-осевым подвешиванием. По опыту эксплуатации число отказов тяговых двигателей зимой в 2—3 раза больше, чем летом.

Тяговые двигатели должны работать при среднегодовой относительной влажности 80 % при 15 °С и 100 % при 25 °С и среднегодовой абсолютной влажности 11 г/м³. Влажность ухудшает объемное и поверхностное сопротивление изоляции и вызывает коррозию деталей, выполненных из металлов.

Верхнее значение атмосферного давления для электрооборудования локомотивов равно 106,7 кПа (800 мм рт. ст.), нижнее — 86,6 кПа (630 мм рт. ст.).

Электрооборудование российских локомотивов предназначено для работы на высоте до 1200 м над уровнем моря.

При низких давлениях окружающего воздуха снижается эффективность естественного и принудительного охлаждения, что особенно опасно для тяговых двигателей. Перегревы электротехнических устройств, работающих на высоте превышающей 1000 м над уровнем моря, повышаются на 0,6 °С на каждые 100 м.

Таблица 2.5

Факторы, влияющие на изоляцию электрооборудования локомотива

Нагрузки (воздействия)	Проявление воздействия
Эксплуатационные	тепловое старение; нарушение монолитности; истирание изоляции
Электрические поля	электрическое старение; коронарные и поверхностные разряды и эрозия поверхности; увеличение диэлектрических потерь
Повышение температуры	тепловое старение; нарушение монолитности
Отрицательные температуры и термоудары	нарушение монолитности; увлажнение
Механические	истирание изоляции; нарушение монолитности
Загрязнение твердыми составляющими и влагой	коронарные и поверхностные разряды и эрозия поверхности; снижение поверхностного и объемного сопротивления; увеличение диэлектрических потерь; образование химически активных соединений

Перегрев обмоток тяговых двигателей на высоте $h > 1000$ м составляет:

$$\tau_h = \tau_{1000} \left(\frac{v_h \lambda_{1000}}{v_{1000} \lambda_h} \right)^n,$$

где v_h, v_{1000} — кинематическая вязкость воздуха соответственно на высоте h и 1000 м;

τ_h, τ_{1000} — теплопроводность воздуха на высоте h и 1000 м;

$n = 0,8$ для тяговых двигателей.

Аналогичным образом можно определить влияние высоты над уровнем моря на перегрев силовых трансформаторов ЭПС, для которых $n = 0,6$.

Воздух, охлаждающий тяговые двигатели, содержит пыль, капельную влагу или снег. Скопление пыли на изолированных поверхностях снижает электроизоляционные свойства, в том числе поверхностное сопротивление, увеличивает термическое сопро-

тивление, что повышает перегревы. Положение усугубляется, если вместе с пылью на поверхность попадает вода или снег. Поверхностное сопротивление изолированных деталей в этом случае снижается на два-три порядка за счет увлажнения поверхности и, дополнительно, за счет растворения некоторых примесей.

Механические примеси в воздухе, охлаждающем тяговые двигатели, содержат кварц (SiO_2), окись железа (Fe_2O_3), железо (Fe_2), окись алюминия (Al_2O_3), окись кальция (CaO), окись магния (MgO), сульфаты (MgSO_4 , CaSO_4 и др.), медь (Cu), свинец (Pb), технические масла.

Размер твердых частиц колеблется в широких пределах. Около 50 % общего объема составляют частицы размером 7,5 мк. Запыленность воздуха, поступающего в систему охлаждения локомотива составляет 10—24 мг/м³, а во время пыльных бурь — до 100 мг/м³.

Содержание пыли в охлажденном воздухе зависит от места его забора, а химический состав — от характера местности, на которой расположена железная дорога, особенности массово перевозимого груза, наличия крупных промышленных предприятий и т.д.

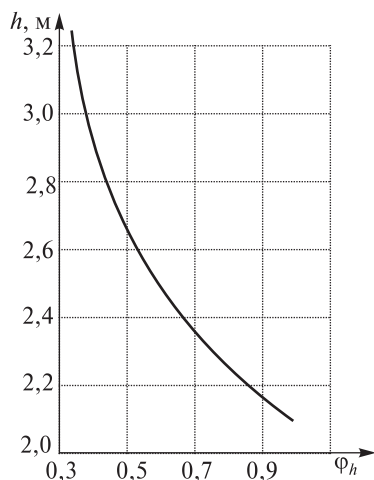


Рис. 2.29. Относительная запыленность воздуха (ϕ_h) в зависимости от высоты расположения воздухозаборных устройств (h)

При эксплуатации локомотивов в местностях, где в летний период воздух насыщен гнусом, качество изоляции ухудшается за счет загрязнения органическими остатками. Последнее, кроме того, активно нарушает антикоррозийные покрытия.

Для исполнения УХЛ интенсивность дождя, при котором должно работать электрооборудование локомотивов, составляет 3 мм/мин — 1 час подряд, 0,5 мм/мин — 5 часов подряд. Воздействие снега на оборудование нормируется в водяном эквиваленте, который равен 10 : 1, так как 10 мм снега эквивалентно 1 мм дождя.

Чтобы снизить отрицательное воздействие пыли и воды на элек-

тробооборудование локомотивов, принимаются различные системы очистки воздуха, а место забора воздуха стараются разместить возможно выше от уровня головок рельсов (рис. 2.29).

Зимой, при резком повышении температуры окружающего воздуха и при вводе локомотива в депо на электротехническом оборудовании, в том числе на тяговых двигателях, образуется иней. Это обстоятельство следует учитывать при организации эксплуатации и ремонта.

Изменение ресурса изоляции при воздействии тепла можно определить по формулам

$$L_T = A \exp\left(\frac{W}{kT}\right),$$

или

$$L_T = a \cdot 2^{\frac{T}{\Delta T}},$$

а электрических факторов ($L_Э$) — по формулам

$$L_Э = CE^{-n},$$

или

$$L_Э = k \exp(-hE).$$

Ресурс изоляции тяговых двигателей при совместном воздействии тепловых и электрических факторов ($L_{ТЭ}$) может быть рассчитан по формуле:

$$L_{ТЭ} = L_0 \exp\left(\frac{-W_a(T-T_0)}{T \cdot T_0} - hE + \frac{b(T-T_0)}{T \cdot T_0}\right),$$

где W_a — энергия активации процессов теплового старения;

T — абсолютная температура;

$\Delta T = (8-12)^\circ$ — шаг повышения температуры изоляции, приводящий к уменьшению срока службы в 2 раза (зависимость Монтзингера или правило 10°);

E — действующее значение напряженности синусоидального или постоянного электрического тока;

T_0 — средневзвешенная абсолютная температура окружающей среды, равная $(273+25)K$;

A, C, a, k, n, h, b — константы, значения которых зависят от свойств изоляционных материалов.

Механические нагрузки, воздействующие на тяговый двигатель и его узлы, можно разделить на три группы.

Первая группа нагрузок создается под воздействием веса и рабочих режимов работы двигателей, в том числе при трогании с места, торможении, прицепке к поезду. Их следует рассматривать как постоянно действующие, а степень нагружения отдельных узлов двигателя определяется конструкцией и параметрами статических и переходных режимов, мощностью двигателя, весом поезда, способом регулирования силы тяги и скорости локомотива и т.д.

Вторая группа нагрузок зависит от степени взаимодействия железнодорожного полотна и локомотива. Их уровень определяется состоянием пути, режимами работы локомотива и прежде всего его скоростью, конструкцией амортизирующих систем и устройств механической части локомотива, способом подвешивания тягового двигателя и конструкцией силовой передачи.

Третья группа нагрузок электрических машин определяется собственными вибрациями. Их величина зависит от точности балансировки вращающихся частей, величины зазора в подшипниках, качества сборки и от выполнения других технологических операций в процессе изготовления отдельных узлов.

Уровень динамических воздействий на тяговый двигатель определяется величиной импульсных сил (P_g):

$$P_g = ma_g = Gkg,$$

где m — масса тягового двигателя;

a_g — величина динамического ускорения;

G — вес тягового двигателя;

g — ускорение свободного падения;

k — кратность динамического ускорения по отношению к g .

Опыт эксплуатации показывает (рис. 2.30), что в режимах работы современных локомотивов, близких к номинальным, исправном пути и опорно-осевом подвешивании, кратность динамического ускорения находится в пределах

$$k = 10\text{—}15,$$

а при скоростях, близких к максимальным,

$$k = 20\text{—}25.$$

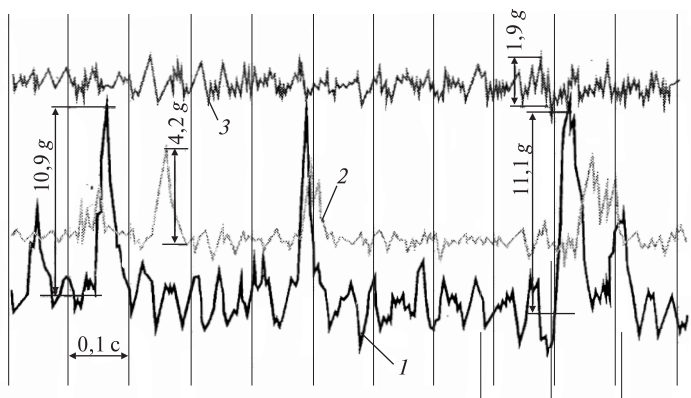


Рис. 2.30. Вибрация тягового двигателя с опорно-осевым подвешиванием на двухсекционном восьмиосном электровозе: 1 — в вертикальном направлении, 2 — вдоль электровоза; 3 — поперек электровоза (путь исправный, прямолинейный участок, летний период, скорость — 40 км/ч)

При опорно-рамном подвешивании и режимах, близких к номинальным,

$$k = 3-5.$$

При работах на пути, не соответствующем требованиям, особенно в зимний период; при волновом износе рельсов, неисправных стыках и т.п. кратность динамического воздействия на тяговый двигатель возрастает в 2—3 раза.

Учитывая сказанное, конструкция электрических машин локомотивов должна соответствовать по механическим воздействиям группам М25—М29 по ГОСТ 17516—90, в том числе тяговые двигатели с опорно-осевым подвешиванием — группе М27, а с опорно-рамным — группе М26.

В соответствии с ГОСТ 2582-81 тяговые двигатели с опорно-осевым подвешиванием должны быть рассчитаны на работу с уровнем вибрации в диапазоне частот от 5 до 700 Гц с ускорением 120 м/с^2 (вертикальная составляющая), на среднеквадратичное значение воздействия многократных ударов (до 100 в минуту) с ускорением 220 м/с^2 и одиночных с ускорением 280 м/с^2 .

Для тяговых двигателей с опорно-рамным подвешиванием максимальные ускорения равны $3g$ в диапазоне частот 1—100 Гц. При

этом отсутствуют многократные удары, а одиночные удары в горизонтальном направлении имеют ускорение, равное $3g$ с длительностью 40—60 мс.

При конструировании тяговых двигателей следует иметь в виду, что механические колебания могут быть двух видов: повторяющиеся через промежуток времени, достаточный для затуханий, и непрерывающиеся до возникновения нового возмущения. Во втором случае возможно возникновение резонанса.

Расчетным режимом при оценке вибропрочности тягового двигателя является движение по прямолинейному участку пути с максимальной скоростью, так как в этом случае уровень динамического воздействия и частота воздействий будут максимальными.

Изменение напряжения питания. Электроподвижной состав железных дорог работает при изменениях напряжения в контактном проводе в пределах, определяемых ГОСТ 6992—68 (табл. 2.6). При этом следует знать, что требования к питанию асинхронных тяговых двигателей в значительной степени определяются исходя из того, что между источником питания (контактная сеть или автономный генератор) и тяговым двигателем всегда находится статический преобразователь частоты и числа фаз, который может выполнять функции стабилизатора напряжения. Максимальное соответствие статического преобразователя и питаемых от него тяговых двигателей обеспечивается тесным и постоянным контактом разработчиков преобразователя и двигателя.

Таблица 2.6

Пределы изменения питающего напряжения

Вид электрифицированного транспорта	Род тока	Напряжение, кВ		
		Номинальное	Наибольшее	Наименьшее
Магистральные железные дороги	Переменный	25	29	19
	Постоянный	3	3,85	2,2
Железные дороги промышленного транспорта	Переменный	10	11,5	7,5
	Постоянный	1,5	1,95	1,1

Преобразователь должен ограничивать изменение напряжения в пределах, обеспечивающих работу двигателей во всех предусмотр-

ренных документацией эксплуатационных режимах. Асинхронный тяговый двигатель должен работать при несимметрии фаз и коэффициенте искажения напряжения, которые определяются техническими требованиями на преобразователь.

Уровень изоляции обмоток тяговых двигателей должен быть скоординирован с величиной его номинального напряжения и величиной перенапряжений, которые могут возникать в эксплуатации в связи с различными штатными и аварийными режимами в силовых цепях локомотива и системах внешнего электроснабжения. Это может быть достигнуто за счет соответствующих конструктивных решений, выбора изоляционных материалов и применения соответствующих технологий изготовления.

Изоляция обмоток тяговых двигателей, получающих питание от контактной сети или через преобразователь, должна выдерживать относительно корпуса в течение одной минуты испытательное синусоидальное напряжение частотой 50 Гц, равное при номинальном напряжении (U) выше 750 В

$$U_{\text{исп}} = 2,25 U + 2000,$$

а при номинальном напряжении до 750 В

$$U_{\text{исп}} = 2,25 U + 1500.$$

Корпусная изоляция тяговых двигателей, получающих питание от автономных источников и тяговых генераторов, должна выдерживать напряжение

$$U_{\text{исп}} = 2U^* + 1000, \text{ но не менее } 1500 \text{ В},$$

где U^* — напряжение в звене постоянного тока тягового статического преобразователя частоты.

При повторном испытании корпусной изоляции испытательное напряжение снижается на 15 % по сравнению с полученным по этим трем формулам.

Для асинхронных тяговых двигателей, получающих питание от контактной сети, U определяется как максимальное напряжение на выходе преобразователя, когда на токоприемнике локомотива напряжение номинальное.

Для тяговых генераторов и тяговых двигателей подвижного состава с автономными источниками питания U равно наибольшему напряжению тягового генератора в продолжительном режиме.

Обмотка статора АТД должна быть сконструирована таким образом, чтобы температура ее перегрева (с учетом использования принятой системы охлаждения) не превышала, в зависимости от выбранного класса изоляции, значений, приведенных в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Предельные допустимые значения превышения температуры обмоток

Узел	Класс изоляции						
	Е	В	Ф	Н	200	220	250
Обмотка статора, °С	115	130	155	180	200	220	250

Превышение температуры обмотки короткозамкнутых роторов должно соответствовать величинам, предусмотренным ГОСТ 183—74, т.е. не должно достигать значений, которые создали бы опасность повреждения самих обмоток и соседних частей.

Температуру обмоток короткозамкнутого ротора определяют методом термометра или по формуле ГОСТ 7217—87:

$$\tau_p = \frac{s_r - s_k}{s_x} (K_0 + t_{ox}) - (t_{or} - t_{ox}),$$

где s_r — скольжение, измеренное в нагретом состоянии двигателя;

s_x — скольжение, измеренное в холодном состоянии двигателя;

t_{or} — температура окружающей среды при определении s_r ;

t_{ox} — температура окружающей среды при определении s_x ;

$K_0 = 235$ для меди, $K_0 = 225$ для алюминия.

Сопротивление изоляции обмоток электрических машин локомотивов, измеренное с помощью мегометра в холодном состоянии, должно быть не менее 20 МОм, сопротивление изоляции относительно заземленных частей после проведения испытаний под нагрузкой, должно соответствовать значениям, приведенным в табл. 2.8.

Таблица 2.8

**Сопротивление изоляции электрических машин локомотивов
в нагретом состоянии**

Номинальное напряжение, В	до 400	400—1000	1000—1500	1500—2000	2000—3000
Сопротивление изоляции, МОм, не менее	1,0	2,5	3,0	4,0	5,0

Исправность тяговых двигателей в значительной степени определяет надежность локомотива, а следовательно, его готовность к работе и производительность.

Чтобы исключить отказы двигателей в пути, они подвергаются осмотрам и ремонтам через регламентированные периоды времени.

В связи с этим одно из требований к конструкции двигателей заключается в том, чтобы они были ремонтпригодными, т.е. обеспечивали возможность с минимальными затратами восстановить работоспособность двигателя.

На практике это означает, что конструкция двигателя должна позволять осуществлять его осмотр и в случае необходимости регулировку и замену (например, датчиков частоты вращения) как из кузова локомотива, так и из смотровой канавы. Должна быть предусмотрена возможность выпрессовки подшипниковых щитов, спрессовки с вала шестерни или деталей муфты силовой передачи. Конструкция обмотки статора и примененные изоляционные материалы должны позволять ее замену без повреждения меди, катушек (секций) и шихтованного статора.

АТД должен быть выполнен в защищенном исполнении и иметь степень защиты, исключающую при механизированной обмывке ходовой части тепловоза проникновение внутрь электродвигателя моющей жидкости в количествах, влияющих на его работоспособность.

Глава 3. ТЯГОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛОКОМОТИВОВ

Глава 3 посвящена рассмотрению устройства и принципов работы тяговых преобразователей локомотивов. За основу принята схема со звеном постоянного тока. Для тепловозов дополнительно рассмотрены конструкции синхронных тяговых генераторов. Приводится описание схем и конструкций тяговых преобразователей электровоза ЭП10 и тепловозов ТЭМ21 и 2ТЭ25А с электрической передачей переменного тока.

Дан обзор элементной базы тяговых преобразователей. Изложены вопросы, связанные с построением защиты преобразователей, конструкции системы охлаждения и проблемой электромагнитной совместимости.

Рекомендуемая литература: [1, 4, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17].

Для управления АТД необходимо регулировать частоту и амплитуду подводимого к нему трехфазного напряжения. Использование для этого непосредственных преобразователей частоты и числа фаз (ПЧФ), выполняющих одноступенчатое преобразование электроэнергии, не получило распространения.

На электровозах постоянного тока в качестве входного используется импульсный стабилизирующий преобразователь (в некоторых случаях он отсутствует).

На электровозах переменного тока в качестве входного выпрямительно-инверторного преобразователя в настоящее время чаще всего используется 4q-S-преобразователь, позволяющий получить на выходе стабилизированное напряжение постоянного тока и имеющий хорошие энергетические показатели. Переменное напряжение с выхода синхронного тягового генератора тепловоза поступает на трехфазный выпрямитель.

Для питания АТД на перспективных локомотивах используется, как правило, инвертор напряжения, который преобразует напряжение звена постоянного тока в трехфазное переменное напряжение, регулируемое по величине и частоте. Как показывает практика, инвертор тока в конструкциях локомотивов более не применяется.

3.1. Элементная база тяговых преобразователей

Промышленное освоение управляемых силовых полупроводниковых приборов, характеризующихся высокими значениями коммутируемой мощности, КПД, массогабаритных показателей и надежности, позволило осуществлять экономичное преобразование электроэнергии и открыло широкие возможности для создания современных преобразовательных устройств.

Основными элементами силовой электроники служат полупроводниковые приборы, обладающие характеристикой ключевого элемента, которые коммутируют (включают и отключают) участки электрической цепи.

Современный силовой полупроводниковый прибор — сложное устройство, содержащее множество различных структур.

Действие ключевого элемента основано на том, что во включенном состоянии он обладает очень малым сопротивлением, а в выключенном — весьма большим. Обозначение ключевого элемента показано на рис. 3.1.

Основными параметрами ключевого элемента являются его сопротивление во включенном и выключенном состояниях, падение напряжения и быстродействие, определяемое временем переключения. Вольт-амперная характеристика «идеализированного» ключевого элемента показана на рис. 3.1, б. Элементы с такими вольт-амперными характеристиками имеют два устойчивых состояния: включенное (проводящее), соответствующее $R_{\text{вкл}} = 0$ (участок 1

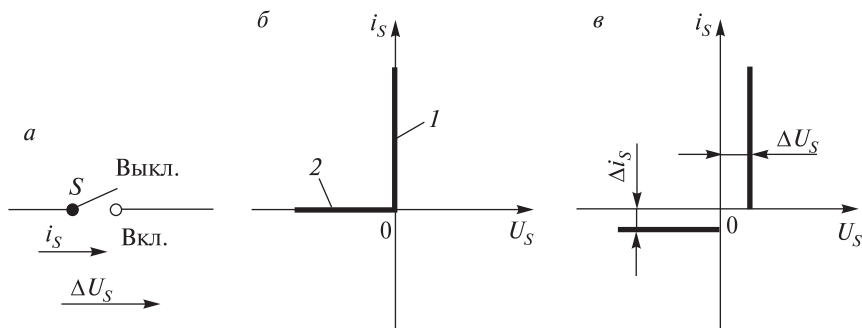


Рис. 3.1. Обозначение ключевого элемента (а) и вольт-амперные характеристики ключевых элементов — идеализированного (б) и реального (в)

вольт-амперной характеристики); выключенное (непроводящее), соответствующее $R_{\text{выкл}} = \infty$ (участок 2). При этом должно обеспечиваться мгновенное переключение из одного состояния в другое и наоборот по соответствующему логическому сигналу управления нулевой мощности.

Реальные ключевые элементы могут лишь приближаться по своим параметрам к идеализированным. При этом разные параметры накладывают и различные ограничения на возможность эффективного использования ключей. Например, вольт-амперная характеристика реального элемента, имеющего падение напряжения при прямом токе ΔU_s и обратный ток Δi_s , определяет потери мощности в проводящем и непроводящем состояниях (рис. 3.1, в).

При работе силовых полупроводниковых приборов в составе преобразователя часть энергии выделяется в виде тепла (тепловые потери). Эти потери разделяются на статические (от протекающего тока) и динамические (на переключение из одного состояния в другое). Потери мощности в ключевом элементе определяют КПД силового электронного устройства, поэтому их снижение является одной из основных задач разработчиков приборов. Динамические потери в ключевом элементе, возникающие в процессе его коммутации, накладывают ограничение на повышение рабочих частот силовых электронных устройств. В то же время повышение рабочих частот силовых электронных устройств является доминирующей тенденцией в силовой электронике за последние годы. Это дает возможность улучшить технико-экономические показатели преобразовательных устройств и повысить их быстродействие.

В настоящее время функции ключевых элементов выполняют полупроводниковые приборы различных типов. К элементам силовой электроники относят приборы, рассчитанные на предельные значения среднего или действующего значения тока более 10 А. Классификацию ключевых элементов проводят по степени их управляемости. При этом под признаком управляемости подразумевают возможность переводить прибор из проводящего состояния в непроводящее и обратно посредством воздействия на него маломощным управляющим сигналом.

По степени управляемости управляемые полупроводниковые приборы разделяются на следующие группы:

– не полностью управляемые приборы, которые можно посредством управляющего сигнала переводить только в проводящее состояние, но не наоборот (традиционные тиристоры, симисторы);

– полностью управляемые (запираемые) приборы, которые можно переводить в проводящее состояние и обратно посредством управляющего сигнала (транзисторы, запираемые тиристоры).

За последние 20—25 лет освоено производство новых полностью управляемых приборов силовой электроники, из которых в настоящее время наибольшее распространение получили следующие типы:

– полевые транзисторы с изолированным затвором (*MOSFET* — Metall-Oxid-Semiconductor Field-Effect-Transistor);

– биполярные транзисторы с изолированным затвором (*IGBT* — Insulated Gate Bipolar Transistor);

– запираемые тиристоры (*GTO* — Gate-Turn-Off);

– запираемые тиристоры с интегрированным управлением (*IGCT* — Integrated Gate Commutated Thyristor).

Главные направления в области разработки перспективных типов *IGBT* в ближайшие годы состоят в расширении диапазона рабочих токов до 6000 А и рабочего напряжения до 10 000 В и упрощения схем управления. Ток управления *IGBT*-транзисторов мал, поэтому цепь управления (драйвер) конструктивно компактна.

Низкий уровень потерь энергии и малая мощность управления современных приборов силовой электроники позволяет реализовать силовые интегральные схемы, в которых на одном кристалле технологическими приемами изготавливаются силовые ключевые элементы, устройства их управления, защиты и диагностики. Такие устройства получили название интеллектуальных схем.

В табл. 3.1 приведены сравнительные характеристики современных приборов силовой электроники.

За последние годы значительно возросли параметры (ток, напряжение, быстродействие) традиционных приборов силовой электроники: диодов, транзисторов и тиристоров.

Кроме приборов одиночного исполнения, выпускаются *силовые модули*, включающие последовательно-параллельные сборки и схемы мостовых конфигураций. Следует отметить, что более половины всех современных силовых полупроводниковых приборов

Таблица 3.1

Сравнительные характеристики силовых полупроводниковых приборов

Тип прибора	Преимущества	Недостатки	Относительная стоимость, %
Традиционный тиристор (SCR)	Самые низкие потери во включенном состоянии; самая высокая перегрузочная способность; высокая надежность; возможность параллельного и последовательного соединения	Не способен к принудительному запирающему электроду; низкая рабочая частота; необходимость для запирающего иметь специальные контуры принудительной коммутации	100
Запираемый тиристор (GTO)	Способность к управляемому запирающему; сравнительно высокая перегрузочная способность; возможность последовательного соединения; рабочие частоты до 300 Гц при напряжении до 6 кВ	Высокие потери во включенном состоянии; очень большие потери в системе управления; сложные системы управления; большие потери при переключении	200
Запираемый тиристор с интегрированным управлением (IGCT)	Способность к управляемому запирающему; перегрузочная способность такая же, что у GTO; низкие потери во включенном состоянии и на переключение; рабочие частоты до единиц кГц; встроенный блок управления; возможность последовательного соединения	Большие потери в системе управления; сложные системы управления	300
Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT)	Способность к управляемому запирающему; высокая рабочая частота (десятки кГц); простая неэнергоёмкая система управления; возможен встроенный драйвер	Большие потери во включенном состоянии	400

выпускаются в модульном исполнении. В простейшем случае модуль представляет собой один или совокупность нескольких силовых ключевых элементов, а в более сложном — преобразователь параметров электрической энергии. Одно-, двух-, четырех- и шестиключевые модули позволяют создавать компактные и надежные

преобразовательные устройства. Выпускаются также функционально законченные модули, например преобразователь частоты с промежуточным звеном постоянного тока.

Поскольку тяговые преобразователи подвижного состава имеют значительную мощность, они создаются на базе модулей, имеющих один ключевой элемент. Вспомогательные преобразователи локомотивов разрабатываются с использованием как одиночных, так и интегрированных многоключевых модулей.

Модули могут выпускаться как с обратными быстро восстанавливающимися диодами (FRD), так и без них.

Применение готовых модулей позволяет значительно снизить массу, габариты и стоимость преобразовательных устройств. Их применение оказывает существенное влияние не только на технико-экономические показатели оборудования, но и изменяет технологию проектирования устройств силовой электроники, сводя ее к выбору элементов высокой заводской готовности на требуемые входные и выходные параметры.

Регулирование напряжения тиристорных преобразователей осуществляется путем изменения угла отпирания α тиристоров (см. п. 1.3.3, где описан выпрямительно-инверторный преобразователь). С этой целью каждый тиристорный преобразователь оснащается системой управления, которая обеспечивает формирование управляющих импульсов, а также сдвиг этих импульсов по фазе относительно анодного напряжения тиристоров. Такие системы управления называют импульсно-фазовыми.

Системы импульсно-фазового управления тиристорными преобразователями (СИФУ) должны удовлетворять ряду специфических требований, которые можно разделить на две группы: требования, относящиеся к управляющему импульсу, и требования, обусловленные схемой выпрямления и режимами работы тиристорных преобразователей.

Для надежного отпирания тиристора на его управляющий электрод нужно подать импульс определенной полярности и длительности. При этом применяемая СИФУ должна обеспечить ток и напряжение управления, превышающие наибольший ток и напряжение управления, указываемые в паспортных данных тиристора. Кроме того, мощность потерь, выделяющихся в цепи «управляющий электрод — катод» также ограничивается максимально допустимым значением.

Минимальная длительность управляющего импульса должна быть больше времени включения тиристора, а за время существования импульса ток в анодной цепи тиристора должен успеть вырасти до такого уровня, чтобы тиристор не закрылся после снятия управляющего импульса. Форма управляющего импульса должна обеспечивать четкое отпирание тиристора и уменьшение потерь при включении.

Необходимый максимальный диапазон регулирования угла отпирания α для тиристорного преобразователя, работающего как в выпрямительном, так и инверторном режимах, теоретически составляет 180° . Однако максимальный угол регулирования из-за возможности опрокидывания инвертора ограничивается $150\text{--}160^\circ$ (см. рис. 1.19).

СИФУ должна обеспечивать симметрию управляющих импульсов по фазам. Асимметрия вызывает неравномерную нагрузку тиристорov из-за различной продолжительности их работы и приводит к ухудшению условий работы питающего трансформатора и сглаживающего дросселя. Допустимая величина асимметрии управляющих импульсов не более 3° .

Наиболее распространенными являются многоканальные синхронные системы управления тиристорными преобразователями, построенные по вертикальному принципу. Особенностью многоканальных СИФУ является то, что формирование и фазовый сдвиг импульсов осуществляется в отдельном канале для каждого ветильного плеча многофазного тиристорного преобразователя.

В синхронных СИФУ отсчет угла α выполняется от моментов естественного отпирания для каждого плеча моста (или для каждой пары противофазных плеч). Синхронизация с питающей сетью заключается в том, что управляющие импульсы для каждого тиристора преобразователя генерируются в диапазоне, жестко связанном с периодичностью повторения анодного напряжения.

Функциональная схема одного канала СИФУ показана на рис. 3.2. Каждый канал, как правило, содержит фазодвигающее устройство ФСУ и формирователь импульсов ФИ. Фазосдвигающее устройство в свою очередь содержит устройство синхронизации с сетью С, генератор развертки ГР и пороговое устройство (нуль-орган) НО. На вход НО подается, кроме опорного напряжения, сигнал управления тиристорного преобразователя U_r . В общем

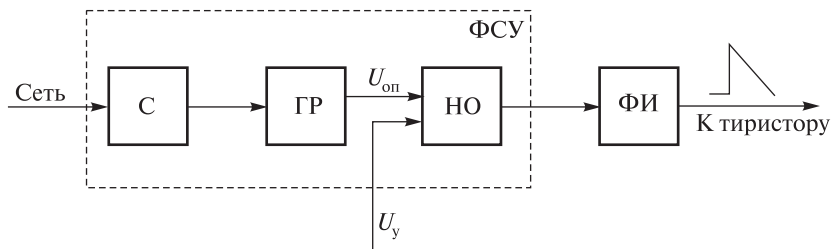


Рис. 3.2. Функциональная схема одного канала СИФУ

случае напряжение U может подаваться через специальное входное устройство, осуществляющее согласование параметров сигнала управления тиристорного преобразователя со входом СИФУ.

В момент равенства опорного напряжения и напряжения управления U пороговое устройство переключается и формирователь импульсов $\Phi И$ в этот же момент времени выдает управляющий импульс.

В СИФУ используют два вида опорных напряжений: линейно изменяющееся во времени (треугольное) и косинусоидальное. В последнем случае результирующая регулировочная характеристика тиристорного преобразователя получается линейной: $U_d = KU_r$.

В многофазных системах число каналов СИФУ соответствует числу фаз тиристорного преобразователя. Работа каждого канала синхронизируется с соответствующей фазой напряжения сети. Для обеспечения симметрии работы системы управления узел введения сигнала управления тиристорного преобразователя U_y выполняется общим для всех каналов.

Основной элементной базой для построения преобразователей частоты современных частотно-регулируемых тяговых электроприводов являются IGBT-транзисторы.

Устройство управления, которое формирует выходные сигналы требуемой мощности и формы для управления IGBT-транзистором и изготовлено в виде отдельной интегральной схемы, называется *драйвером*. Основная задача драйвера — быстрое включение и мягкое выключение транзистора, обеспечение его защиты от аварийных режимов, выдача информации для диагностики состояния транзистора, усиление и гальваническая развязка сигналов управления, обеспечение помехозащищенности.

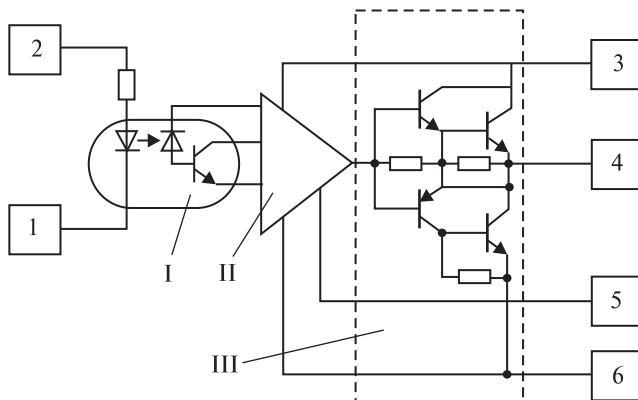


Рис. 3.3. Структурная схема драйвера IGBT-транзистора: I — входной узел; II — узел согласования; III — выходной узел; 1, 2 — клеммы входного сигнала; 3, 6 — клеммы для подключения источника питания; 4, 5 — клеммы выходного сигнала

Драйвер является законченным устройством, содержащим встроенную защиту, что определяет высокую надежность системы в целом. В его состав входят изолированный блок питания, оптические приемопередатчики, схемы усиления сигналов, контроля напряжения питания, контроля включения транзистора за определенное заданное время (защита от коротких замыканий в нагрузке), защиты от перенапряжения на транзисторе. С помощью резисторов на выходе драйвера обеспечивается раздельное регулирование времени включения и отключения транзистора. В случае срабатывания защит в систему управления выдается через оптический передатчик гальванически развязанный сигнал.

Драйвер (рис. 3.3) содержит входной узел I, принимающий сигнал информационного канала; узел согласования II, преобразующий информационный сигнал в сигнал управления необходимого уровня; выходной узел III, осуществляющий окончательное формирование импульса управления требуемой мощности и формы.

3.2. Применение силовых полупроводниковых приборов на тяговом подвижном составе

Применение силовых полупроводниковых приборов на тяговом подвижном составе железных дорог имеет ряд особенностей,

связанных со спецификой работы преобразователей на их основе в составе транспортного средства, жесткими ограничениями по массе и габаритам, широким диапазоном температур окружающей среды, большими динамическими (механическими) нагрузками и высокими требованиями к надежности работы. На современных образцах подвижного состава (электровозах, тепловозах, электропоездах) статические полупроводниковые преобразователи используются в составе тягового и вспомогательного электропривода, для питания электрооборудования вагонов поезда и т.п. Области применения приборов силовой электроники следующие.

Однооперационные тиристоры (SCR) — преобразователи с естественной (сетевой) коммутацией большой мощности (свыше 1 МВА), применяемые в качестве выпрямителей на электровозах переменного тока для регулирования напряжения на коллекторных ТЭД и на тепловозах с синхронными тяговыми генераторами (см. пп. 1.3.3 и 1.3.4).

Запираемые тиристоры (GTO) — тяговые преобразователи мощностью несколько МВА. На базе GTO-тириستоров могут быть созданы входные преобразователи электровозов постоянного и переменного тока, полностью управляемые выпрямители тепловозов, инверторы для питания тяговых двигателей. В настоящее время эта технология считается устаревшей и при проектировании новых локомотивов не применяется.

Биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) — преобразователи мощностью до нескольких МВА для тяговых и вспомогательных преобразователей локомотивов. Применение IGBT-транзисторов при проектировании тяговых преобразователей для питания АТД в настоящее время считается наиболее перспективным.

Полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET) — высокочастотные преобразователи (сотни килогерц) и низковольтные преобразователи для приводов вентильных двигателей, ключевых источников питания и т.п.

Симмисторы (Triac) — преобразователи для пуска и управления двигателями переменного тока, ключи и реле.

Полностью управляемые приборы силовой электроники в настоящее время вытесняют практически из всех областей применявшиеся ранее традиционные тиристоры и биполярные силовые

транзисторы, так как при тех же коммутируемых токах и напряжениях они имеют значительно меньшие мощности управления и время коммутации, стойкость к перегрузкам по току и напряжению. Высокие частоты коммутации (до 5 кГц при коммутируемом токе до 2 кА), простота и малая мощность систем управления обеспечили значительное улучшение технико-экономических показателей (снижение габаритов и массы, повышение надежности и КПД) преобразовательного оборудования на базе IGBT по сравнению с оборудованием тиристоров (SCR).

Параметры приборов силовой электроники непрерывно улучшаются, например за последние два десятилетия сменилось несколько поколений IGBT. Величина коммутируемого напряжения увеличилась с 1,2—1,7 кВ в конце 80-х гг. XX в. до 6,5—7,0 кВ в настоящее время; намечается производство IGBT с еще большим коммутируемым напряжением. Прямое падение напряжения уменьшилось: 4 В у первого поколения; 3,3 В — у второго, 2,1 В — у третьего и 1,2 В — в настоящее время.

На рис. 3.4 показаны различные варианты мощных IGBT как в модульном исполнении (паяная конструкция с изолированным основанием — слева), так и прижимной (таблеточной конструкции — справа). На рис. 3.5 в качестве примера показан драйвер с оптическими приемопередатчиками, предназначенный для управления IGBT в модульном исполнении и устанавливаемый непосредственно на модуль.

Рекомендации по выбору силовых полупроводниковых приборов. Максимально допустимое напряжение, указываемое в паспорте на прибор, никогда не должно быть превышено в процессе работы преобразователя, даже кратковременно. В связи с этим рекомендуемый уровень загрузки по напряжению принимается равным 0,5—0,7 от максимально допустимого по паспорту.



Рис. 3.4. Варианты исполнения мощных IGBT-транзисторов

По токовой загрузке прибора следует иметь в виду, что не допускается работа прибора с токами, превышающими максимально допустимое

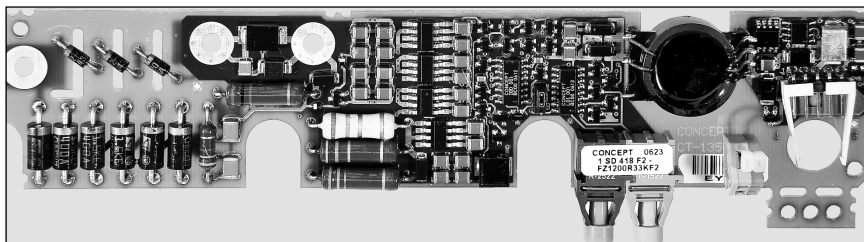


Рис. 3.5. Общий вид драйвера для управления IGBT в модульном исполнении

значение, указываемое в паспорте в течение заданного времени (например, для транзисторов 1200 А, 33-го класса обычно это двукратная перегрузка в течение 1 мс). При уменьшении времени перегрузка может быть увеличена. Длительно допустимая загрузка прибора лимитируется исключительно возможностью отвода тепла от кристалла прибора. При работе IGBT-модуля в составе преобразователя часто ограничивающим по теплу элементом является не транзистор, а обратный диод. Частой ошибкой является также выбор полупроводникового прибора с загрузкой по действующему значению тока, рассчитанной для номинальной выходной частоты. В процессе пуска тягового привода с пониженной выходной частотой через транзистор фактически длительное время (до 0,5 с) протекает амплитудное значение тока. За указанный промежуток времени кристалл успевает разогреться до недопустимой температуры. Рекомендуемый выход из данной ситуации — снижение частоты модуляции на время запуска с целью снижения динамических потерь. При этом на низких выходных частотах гармонические искажения выходного тока от снижения частоты модуляции незначительны.

Диапазон рабочей температуры и температуры хранения приборов, их вибростойкость, длительная устойчивость к термоциклированию также должны быть объектом первостепенной значимости при их выборе. Даже однократное охлаждение прибора до температуры ниже предельно допустимой приведет к тому, что класс прибора по напряжению снизится из-за изменения свойств изоляционного материала (геля), которым заливается модуль.

Важнейшими компонентами, позволяющими создавать современные малогабаритные тяговые преобразователи, являются сило-

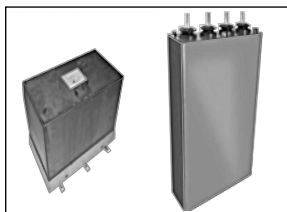


Рис. 3.6. Внешний вид конденсаторов тяговых преобразователей

вые высоковольтные пленочные конденсаторы, которые необходимы для сглаживания напряжения в звене постоянного тока, обмена реактивной энергией между двигателем и источником питания, создания сетевого фильтра для подавления токов помех (электровозы постоянного тока), построения режекторных фильтров (электровозы переменного тока). На рис. 3.6, слева, показан внешний вид пленочных сухих конденсаторов, используемых в тяговых преобразователях. В преобразователях собственных нужд на низковольтной стороне возможно применение силовых электролитических конденсаторов.

На электровозах рациональнее использовать маслonaполненные конденсаторы (рис. 3.6, справа). Четыре вывода необходимы для снижения их индуктивности. Современные конденсаторы изготавливаются по технологии управляемого самовосстановления.

При выборе конденсаторов следует руководствоваться рекомендациями производителя. Величина емкости строго определяется требуемыми параметрами электропривода (главным образом, коэффициентом мощности нагрузки преобразователя, а для электровозных тяговых преобразователей (ТП) еще и требованиями к входному и режекторному фильтрам), а величина рабочего напряжения выбирается обычно с запасом. При выборе запаса необходимо иметь в виду, что современные конденсаторы допускают длительные (на испытаниях до 10 с) перенапряжения до $1,5U_{\text{ном}}$.

Современные тяговые преобразователи оборудованы необходимым набором быстродействующих датчиков: фазных токов на входе выпрямителя, постоянного напряжения на выходе выпрямителя, фазных токов на выходе АИН (рис. 3.7). Эти датчики совместно с датчиками частоты вращения валов асинхронных двигателей позволяют реализовать регулирование АТД с автоматической стабилизацией потокосцепления, выполнить диагностирование элементов преобразователя, защиту ТП от коротких замыканий и перегрузок.

При выборе датчиков особое внимание следует обратить на напряжение изоляции между силовой частью и выходом, температурный диапазон работы, вибропрочность, быстродействие. Дат-

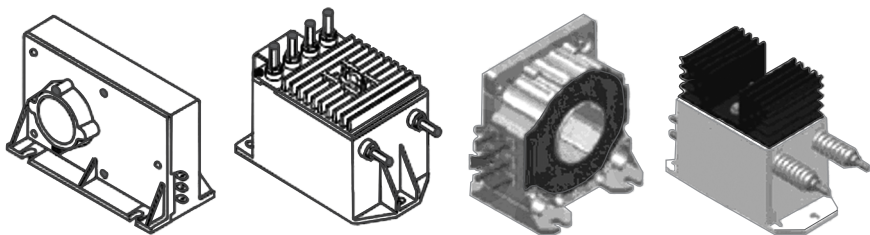


Рис. 3.7. Общий вид датчиков тока и напряжения фирм LEM и Morssmitt

чики бывают с токовым выходом (т.е. в выходном каскаде установлен источник тока) и с выходом напряжения. Если расстояние от источника и приемника сигнала более 2—3 м и при передаче сигнала возможны сбои из-за помех, лучше использовать датчики с токовым выходом.

Основой элементной базы систем управления ТП являются цифровые сигнальные процессоры со встроенными менеджерами событий с функциями прямого цифрового управления силовыми ключами инвертора.

3.3. Тяговые трансформаторы и преобразователи электровозов

Полупроводниковый преобразователь следует рассматривать как устройство, включенное между электрическими цепями источника и потребителя и осуществляющее преобразование параметров электрической энергии, которой обмениваются эти цепи.

В качестве источника выступают контактная сеть для электровозов постоянного тока либо вторичные обмотки трансформатора для электровозов переменного тока. Потребителем тягового преобразователя является тяговый двигатель.

Параметрами электрической энергии являются напряжение и ток, а устройства, осуществляющие их преобразование, могут быть классифицированы как преобразователи напряжения либо преобразователи тока.

3.3.1. Входные преобразователи электровозов постоянного тока

На электровозах, питающихся от контактной сети постоянного тока, входной импульсный преобразователь предназначен для

регулирования напряжения и устранения влияния колебаний напряжения питающей сети на промежуточное звено. Комбинированный импульсный преобразователь постоянного напряжения с разделительными конденсаторами (рис. 3.8) позволяет получить в промежуточном звене постоянного тока напряжение как выше, так и ниже напряжения питающей сети. Каждый из двух последовательно включенных модулей представляет собой комбинацию импульсных прерывателей постоянного напряжения (в верхнем модуле на схеме — это транзистор VT1 и диод VD2) и постоянного тока (транзистор VT4, диод VD3).

В зависимости от режима работы постоянно проводят ток транзистор VT1 (режим прерывателя тока) или диод VD3 (режим прерывателя напряжения). В качестве реакторов L_1 , L_2 на двухсистемных электровозах могут быть использованы тяговые обмотки

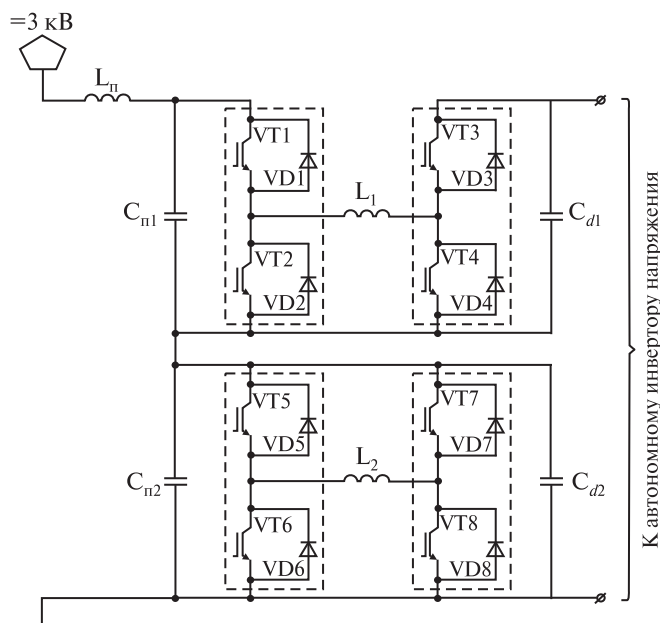


Рис. 3.8. Схема входных силовых цепей электровозов с комбинированным импульсным преобразователем: L_n и C_n — дроссель и конденсатор входного фильтра; L_1 , L_2 — дроссели промежуточного звена постоянного тока; C_{d1} , C_{d2} — конденсаторы звена постоянного тока

силового трансформатора. Если необходимо понизить напряжение на конденсаторе C_{d1} по отношению к напряжению на конденсаторе $C_{п}$, регулируют длительность включения транзистора VT1 от минимальной за период до максимальной, т.е. при постоянном включении. В случае необходимости повысить напряжение увеличивают длительность включения транзистора VT4.

Достоинством схемы является возможность стабилизации напряжения на нагрузке при всех допустимых изменениях его в питающей сети, недостатком — значительные токи через тиристоры и диоды и, как следствие, увеличенные потери.

В силовых цепях с понижающими импульсными преобразователями и общим звеном постоянного тока (рис. 3.9) последовательно соединены две группы импульсных прерывателей постоянного напряжения. По выходу импульсные прерыватели включены парал-

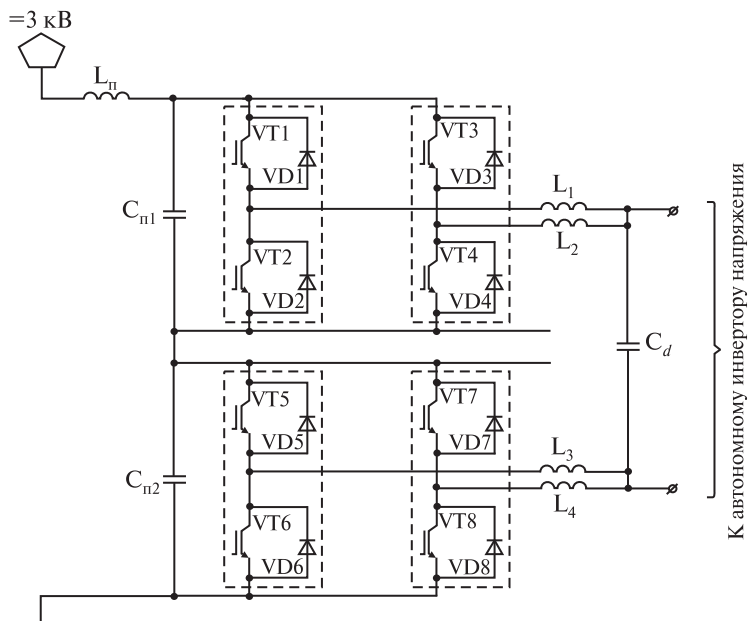


Рис. 3.9. Схема входных силовых цепей электровозов с понижающими импульсными преобразователями: $L_{\text{п}}$, $C_{\text{п1}}$ и $C_{\text{п2}}$ — дроссель и конденсаторы входного фильтра — делителя напряжения; L_1 — L_4 — дроссели промежуточного звена постоянного тока; C_d — конденсатор звена постоянного тока

тельно. В зависимости от алгоритма управления результирующая частота пульсаций тока, потребляемого из контактной сети, будет двойной или четырехкратной по отношению к рабочей частоте одного импульсного прерывателя. При этом каждый прерыватель нагружен половинным током потребителя. Такая схема силовых цепей обеспечивает передачу большей мощности при относительно малом числе полупроводниковых приборов. Однако при этом технически невозможно повысить напряжение промежуточного звена, когда напряжение в контактной сети становится ниже номинального. Напряжение промежуточного звена снижается по мере уменьшения напряжения контактной сети.

В силовых цепях с разделенными звеньями постоянного тока и индивидуальным режимом работы асинхронных тяговых двигателей (рис. 3.10) две группы из двух параллельно соединенных импульсных прерывателей питают два промежуточных звена по-

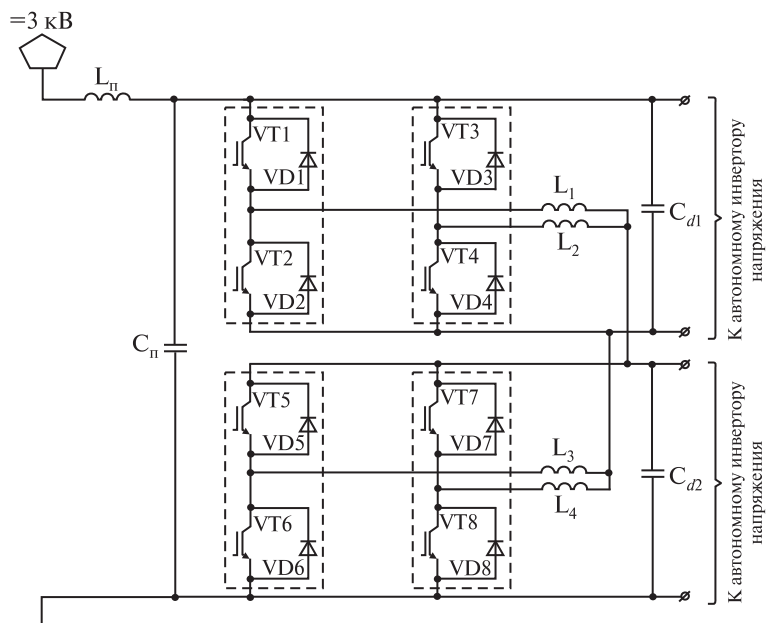


Рис. 3.10. Схема входных силовых цепей электровозов с индивидуальным регулированием тяговых двигателей: L_{π} и C_{π} — дроссель и конденсатор входного фильтра; L_1 — L_4 — дроссели промежуточного звена постоянного тока; C_{d1} , C_{d2} — конденсаторы звена постоянного тока

стоянного тока. Прерыватели и промежуточные звенья разделены реакторами.

Средний ток транзисторов в открытом состоянии составляет $1/4$ полного тока, потребляемого из контактной сети.

Алгоритмы работы импульсных прерывателей в этой схеме зависят от фактического напряжения в контактной сети и распределения нагрузки между двумя инверторами напряжения. Средний ток через вентили мал, а потому малы и потери в полупроводниковых приборах.

Силовые цепи, схемы которых приведены на рис. 3.8—3.10, являются реверсивными, т.е. обеспечивают рекуперативное торможение. В случае питания электровоза от контактной сети переменного тока на электровозах двойного питания они при минимальном количестве переключений преобразуются в схему 4q-S-преобразователя.

Выбор схемотехнических решений силовых цепей зависит от многих факторов, среди которых наиболее важными являются мощность, габаритные размеры и масса компонентов, их стоимость и надежность.

Схемы силовых цепей с комбинированными импульсными преобразователями содержат малое количество фазовых модулей и реакторов, но имеют большие потери мощности в полупроводниковых приборах и большое число контактов, переключающихся при изменении рода тока в системе тягового энергоснабжения. Для устранения перегрузок необходимо дополнительное оборудование и специальные средства управления и защиты.

В схеме силовых цепей с понижающими импульсными прерывателями и общим промежуточным звеном постоянного тока использовано небольшое количество фазовых модулей, потери мощности в полупроводниковых приборах невелики. Элементы фильтра могут быть легко объединены и хорошо используются при работе от всех систем энергоснабжения, что способствует снижению массы электрооборудования. Число контакторов, необходимых для переключения электрооборудования при смене рода тока, при такой схеме меньше, чем в предыдущей. Алгоритмы управления и защиты импульсных прерывателей не отличаются особой сложностью.

Преобразователь с отдельным регулированием напряжений промежуточных звеньев содержит большое число фазовых моду-

лей, однако количество контакторов в ней минимально, малы и потери в полупроводниковых приборах. Такая схема силовых цепей наиболее целесообразна для мощного подвижного состава.

3.3.2. Тяговые трансформаторы электровозов переменного тока

Силовые трансформаторы применяются на электровозах для понижения напряжения контактной сети переменного тока до величины, требуемой для системы питания тяговых двигателей, вспомогательного привода, отопления пассажирских вагонов (на пассажирских электровозах) и другого оборудования.

Исходя из условий компоновки оборудования, трансформатор может располагаться либо в кузове, либо под кузовом электровоза. Трансформаторы для различных вариантов размещения показаны на рис. 3.11 и 3.12.

Если трансформатор расположен под кузовом, его конструкция должна обладать повышенной механической прочностью для защиты от возможных ударов элементов верхнего строения пути (главным образом, щебенки), поднятых потоком воздуха при движении.

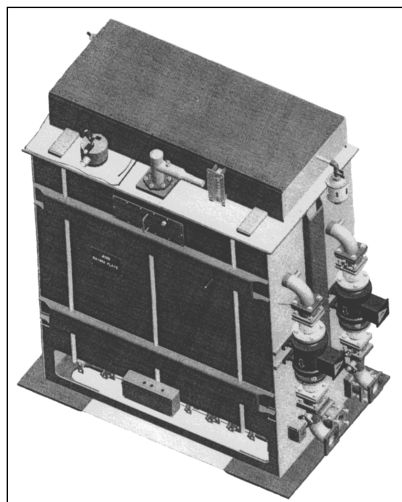


Рис. 3.11. Общий вид тягового трансформатора электровоза ЭП20 (установка в кузове)

Тяговые трансформаторы являются многообмоточными. Количество обмоток на вторичной стороне трансформатора определяется количеством независимых цепей, получающих от него питание. Часто в баке трансформатора размещаются дроссели.

В качестве примера на рис. 3.13 приведена схема обмоток силового трансформатора электровоза ЭП20.

В табл. 3.2 приведены основные характеристики силовых трансформаторов отечественных электровозов с АТД.

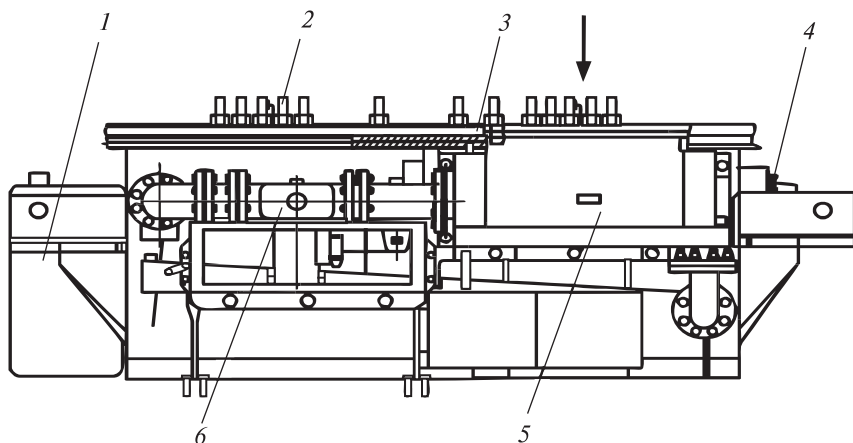


Рис. 3.12. Тяговый трансформатор электровоза 2ЭС5 (установка под кузовом, вид сбоку): 1 — расширитель; 2 — выводы вторичных обмоток; 3 — крышка трансформатора; 4 — выводы высоковольтной (сетевой) обмотки; 5 — охладитель; 6 — масляный насос. Стрелкой показано направление подачи воздуха

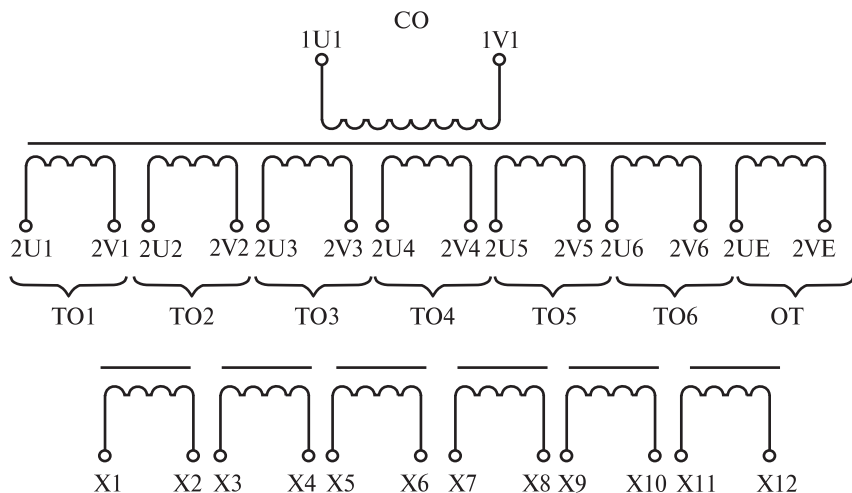


Рис. 3.13. Схема обмоток тягового трансформатора электровоза ЭП20: CO (1U1-1V1) — сетевая обмотка; TO1—TO6 (2U1-2V1, 2U2-2V2, 2U3-2V3, 2U4-2V4, 2U5-2V5, 2U6-2V6) — вторичные (тяговые) обмотки; OT (2UE-2VE) — обмотка отопления; X1-X2, X3-X4, X5-X6, X7-X8, X9-X10, X11-X12 — дроссели режекторных фильтров

Таблица 3.2

**Технические характеристики силовых трансформаторов электровозов
с асинхронным тяговым приводом**

Параметр		Тип электровоза		
		ЭП10	ЭП20	2ЭС5
1	Номинальное напряжение силовой обмотки, кВ	25	25	25
2	Номинальная мощность сетевой обмотки, кВА	9270	9600	5140
3	Номинальный ток силовой обмотки, А	370,8	372	186
4	Номинальное напряжение тяговых обмоток, В	1196	1415	1415
5	Номинальный ток тяговых обмоток, А	1124	1030	910
6	Количество тяговых обмоток	6	6	4
7	Напряжение обмотки отопления, В	3000	3000	—
8	Мощность обмотки отопления, кВт	1200	1200	—
9	Номинальный ток обмотки отопления, А	400	400	—
10	Полные электрические потери, кВт	303	300	200
11	Масса, кг	7920	7000	6100
12	Напряжение короткого замыкания, %			
	первичной и каждой тяговой обмотки;	65	60	60
	тяговых обмоток между собой	108—122	110	110
13	Индуктивность первичной обмотки, мГн	2,2	2,5	3,3
14	Габариты (длина, ширина, высота), мм	2246, 1115, 2220	2700, 1050, 2300	2900, 2000, 1150
15	КПД, %	96,9	96,4	95,7
16	Место размещения	в кузове	в кузове	под кузовом

Конструкция тяговых трансформаторов включает активную часть, бак и систему охлаждения.

Основу активной части составляет магнитопровод, состоящий из двух стержней. Их соединяют два ярма. Магнитопровод набира-

ют из тонколистовой холоднокатанной электротехнической стали с электроизоляционным покрытием.

Для более полного использования объема, занятого обмотками, выполненными в виде цилиндров, сечение стержней магнитопровода стремятся приблизить к круговому. Для этого их набирают из листов стали различной ширины (рис. 3.14). Магнитопровод заземляют с помощью медной ленты.

На стержнях магнитопровода расположены обмотки. Соотношение напряжений сетевой (первичной) и вторичной обмоток трансформатора, называемое коэффициентом трансформации k , определяется как соотношение числа витков этих обмоток

$$k = \frac{U_{co}}{U_2} = \frac{w_1}{w_2};$$

падением напряжения в обмотках под нагрузкой пренебрегаем.

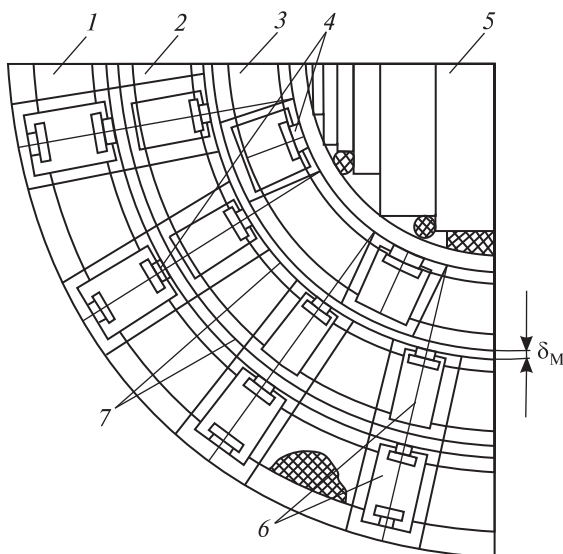


Рис. 3.14. Поперечное сечение стержня трансформатора с обмотками: 1, 2, 3 — обмотки; 4 — фиксирующие рейки; 5 — магнитопровод; 6 — изоляционная прокладка; 7 — изоляционные цилиндры; δ_M — регулировочный зазор

Обмотки обычно выполняются из одного или нескольких параллельных медных проводов прямоугольного сечения, они представляют собой самостоятельные сборочные единицы. Обмотки могут быть непрерывными, дисковыми, винтовыми и цилиндрическими. Непрерывные обмотки применяются при большом числе витков и сравнительно небольших токах, например для сетевых обмоток. Тяговые обмотки обычно винтовые, обмотки собственных нужд (если имеются) — дисковые.

Обмотки тяговых трансформаторов необходимо располагать симметрично на обоих стержнях.

Активная часть (магнитопровод с обмотками) располагается в баке, наполненном трансформаторным маслом. Бак представляет собой стальной резервуар прямоугольной, овальной или восьмигранной формы.

Подводимая к трансформатору энергия $P_1 dt$ преобразуется в энергию $P_2 dt$, при этом часть энергии, равная $(P_1 - P_2) dt$, рассеивается в виде тепла.

Подводимую мощность представим в виде

$$P_1 = P_2 + P_{\Sigma} + P_m + P_d,$$

где P_2 — нагрузка трансформатора;

P_{Σ} — потери в токоведущих частях;

P_m — потери в магнитной системе;

P_d — диэлектрические потери в изоляции.

Предельная температура масла в верхних слоях не должна превышать 110 °С, температура обмоток — 120 °С. Для отвода тепла тяговые трансформаторы имеют жидкостно-воздушную систему принудительного охлаждения, которая с помощью масляных электронасосов (одного или двух) обеспечивает циркуляцию масла внутри бака и через секции теплообменников, обдуваемых воздухом.

Масляные насосы могут быть расположены как внутри трансформаторного бака, так и снаружи. Воздух для обдува теплообменников подается или специальными вентиляторами, или же забирается из централизованной системы вентиляции электровоза. Принцип работы системы охлаждения силового трансформатора с одним масляным насосом показан на рис. 3.15.

Бак сверху герметично закрыт крышкой, на которой размещены выводы всех обмоток, и снабжен расширителем. Расширитель принимает избыток масла, образующийся при увеличении его

объема и объема активной части трансформатора при нагреве под нагрузкой.

Изоляция обмоток тяговых трансформаторов, предназначенных для работы при номинальном напряжении в контактном проводе 25 кВ, относительно корпуса должна во время поставки выдерживать в течение одной минуты следующие испытательные напряжения переменного тока частотой 50 Гц (действующее значение): сетевая — 75, тяговая — 9,5, отопления — 9,5 кВ.

При работе электровоза от контактной сети на сетевой обмотке трансформатора допускаются внешние однократные коммутационные перенапряжения амплитудой до 90 кВ длительностью до 2 мс и грозовые с амплитудой до 110 кВ.

Трансформатор должен выдерживать без повреждений внешние короткие замыкания между выводами тяговых обмоток и обмотки отопления в течение 0,15 с при мощности короткого замыкания контактной сети 400 МВА и напряжении 25 кВ. Защита тягового трансформатора от токов короткого замыкания должна осуществляться главным выключателем электровоза, а от атмосферных и коммутационных перенапряжений — ограничителями, установленными на стороне сетевой обмотки.

Защита от местных перегревов обмотки (например, при межвитковых замыканиях) осуществляется с помощью газового реле Бухгольца, устанавливаемого в системе жидкостного охлаждения. При срабатывании реле, система управления должна приводить в действие главный выключатель.

Защиту трансформатора от тепловых перегрузок обеспечивают датчики температуры масла в контуре охлаждения и в верхних слоях бака. При превышении температуры сверх допустимой система управления электровоза, получив соответствующий сигнал, должна ограничить нагрузку.

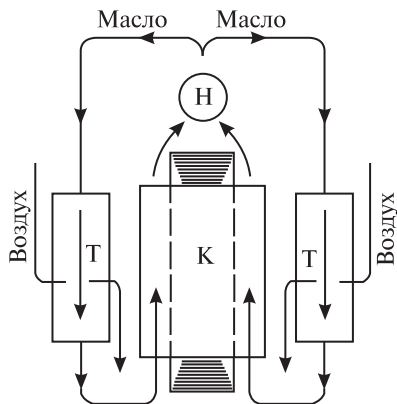


Рис. 3.15. Схема охлаждения силового трансформатора: Н — масляный насос; К — магнитопровод; Т — теплообменник

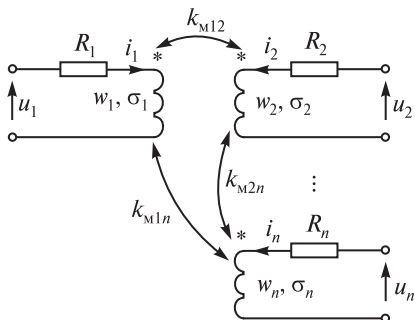


Рис. 3.16. Схема замещения трансформатора: u_j , i_j , R_j , w_j , σ_j — напряжение, ток, активное сопротивление, число витков и коэффициент рассеяния обмотки с номером j ($j = 1, 2, \dots, n$); k_{mjn} — коэффициент магнитной связи между обмотками с номерами j и n

Изучение процессов в трансформаторах можно выполнить с применением математических моделей, аналогичных используемым при исследовании АТД. Трансформатор в этом случае представляет собой двигатель с заторможенным ротором. Отсутствие в тяговом трансформаторе изменения взаимного расположения обмоток упрощает задачу. Схема замещения трансформатора показана на рис. 3.16. Следует иметь в виду, что магнитные потоки в трансформаторе — трехмерные.

Взаимоиндуктивность двух обмоток с номерами j и m определяется по формуле:

$$M_{jm} = w_j w_m k_{mc} \lambda_m,$$

где w_j , w_m — число витков обмоток с номерами j и m ;

k_{mc} — коэффициент магнитной связи для обмоток с номерами j и m ;

λ_m — магнитная проводимость магнитопровода, зависящая от величины основного магнитного потока.

Собственная индуктивность обмотки с номером j может быть найдена из выражения:

$$L_j = w_j^2 \sigma_j \lambda_m,$$

где σ_j — коэффициент рассеяния для обмотки с номером j .

Исследование процессов, происходящих в тяговом трансформаторе, необходимо для оценки их влияния на статический преобразователь частоты и числа фаз и в первую очередь на входной выпрямитель.

3.3.3. Входные преобразователи электровозов переменного тока

В настоящее время на ЭПС переменного тока для питания АТД преимущественно используются преобразователи с явно выраженным звеном постоянного тока, выполняющие двухступенчатое

преобразование электроэнергии. В режиме тяги это выпрямление напряжения, отбираемого со вторичной обмотки трансформатора, и последующее его инвертирование в трехфазное для питания АТД.

Для того чтобы мог быть реализован режим рекуперативного торможения, входной преобразователь должен иметь возможность работы в режиме инвертора.

В качестве преобразователя частоты и числа фаз для питания АТД на подвижном составе может использоваться автономный инвертор тока (АИТ, см. ниже п. 3.3.5) или автономный инвертор напряжения (АИН, см. ниже п. 3.3.4). В первом случае входной преобразователь должен допускать регулирование в широком диапазоне напряжения в звене постоянного тока, во втором случае — стабилизировать это напряжение на заданном уровне.

При использовании АИТ, в качестве входного применяется выпрямительно-инверторный преобразователь с зонно-фазным регулированием.

При использовании АИН, который выполняет функции не только преобразования частоты напряжения, но и регулирования его величины за счет модуляции, на электровозах переменного тока с АТД в качестве входного применяют 4q-S-преобразователь, стабилизирующий напряжение в звене постоянного тока (т.е. на входе АИН). За счет применения современной элементной базы, имеющей повышенную частоту переключений СПП, 4q-S-преобразователь имеет высокий коэффициент мощности и значительно меньшие, чем при зонно-фазном регулировании, искажения формы сетевого тока.

На рис. 3.17 приведена упрощенная принципиальная схема силовых цепей 4q-S-преобразователя. Первичная обмотка трансформатора Т питается от сети переменного тока с напряжением U_c . Вторичная обмотка трансформатора через дроссель L_c подсоединена к четырем плечам 4q-S-преобразователя, образуемым IGBT-транзисторами VT1—VT4 и диодами VD1—VD4. К выходу преобразователя подключены резонансный ($L_{\phi 1}$, $C_{\phi 1}$) и главный (C_{ϕ}) фильтры, включенные параллельно нагрузке.

Особенностью 4q-S-преобразователя является то, что он является преобразователем повышающего типа и для его нормальной работы напряжение на конденсаторе главного фильтра (C_{ϕ}) должно

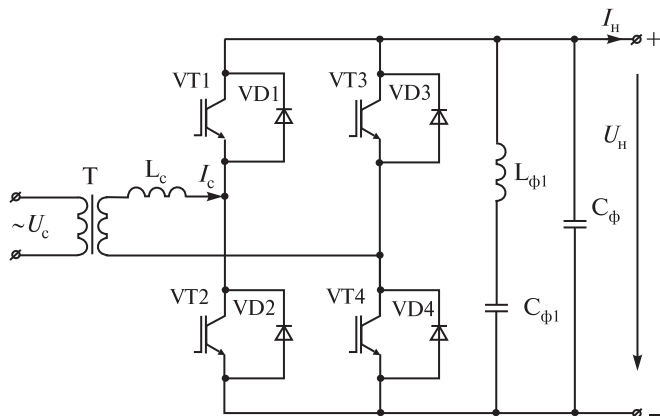


Рис. 3.17. Упрощенная принципиальная схема 4q-S-преобразователя

быть больше амплитуды напряжения источника питания (в данном случае вторичной обмотки трансформатора).

Управление 4q-S-преобразователем может быть реализовано либо с помощью прямого регулирования тока вторичной обмотки трансформатора (режим токового коридора) либо с помощью синусоидальной широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

При использовании режима токового коридора сетевой ток (I_c) формируется в виде синусоиды с заданным сдвигом по фазе относительно питающего напряжения:

$$I_3(t) = I_{3\max} \sin(2\pi f_c t - \varphi_0), \quad (3.1)$$

где I_3 — заданное значение сетевого тока;

$I_{3\max}$ — амплитудное значение заданного тока;

f_c — частота питающей сети;

φ_0 — сдвиг по фазе между заданным током и питающим напряжением.

Управление транзисторами VT1—VT4 осуществляется следующим образом. Задается амплитудное значение сетевого тока и ширина токового коридора I_3 (рис. 3.18). В начале полупериода величина питающего напряжения недостаточна, чтобы обеспечить нарастание тока дросселя (I_c) с требуемой для нахождения внутри токового коридора интенсивностью. Поэтому заряд дросселя (L_c) осуществляется от конденсатора фильтра (C_ϕ) через VT2, VT3 в положительный полупериод и VT1, VT4 — в отрицательный. Когда ток I_c возрастает до верхней границы коридора, дроссель разря-

жается на источник питания через VT3, VD1 в положительный и VT4, VD2 в отрицательный полупериоды питающего напряжения. Когда ток снижается до нижней границы коридора, дроссель снова заряжают и т.д.

Такой режим соответствует I и III зонам (для положительного и отрицательного полупериодов) работы 4q-S-преобразователя.

В определенный момент ЭДС самоиндукции дросселя оказывается недостаточной, чтобы в режиме разряда преодолевать возрастающее питающее напряжение (ток I_c начинает возрастать, вместо того, чтобы снижаться). Это является условием перехода от I (III) зоны ко II (IV). Дроссель заряжается от источника питания через VT3, VD1 в положительный и VT4, VD3 — в отрицательный полупериоды. Разряд осуществляется на конденсатор фильтра (C_Φ) через VD1, VD4 и VD2, VD3 в положительный и отрицательный полупериоды питающего напряжения соответственно.

Режим инвертирования может быть получен за счет увеличения φ_0 выше 90 эл. градусов.

Таким образом, в I и III зонах 4q-S-преобразователь работает в режиме инвертирования, а во II и IV — в режиме выпрямления, что дает возможность компенсировать как реактивную мощность, потребляемую дросселем, так и обусловленную током намагничивания трансформатора и индуктивностью рассеяния его первичной обмотки за счет задания φ_0 в пределах от 0 до 90 эл. градусов.

Регулирование выходного напряжения осуществляется за счет изменения тока задания, для чего может быть использован ПИ-регулятор.

Управление 4q-S-преобразователем в режиме токового коридора позволяет добиться хорошего качества регулирования, но при его использовании частота переключения СПП может быть доста-

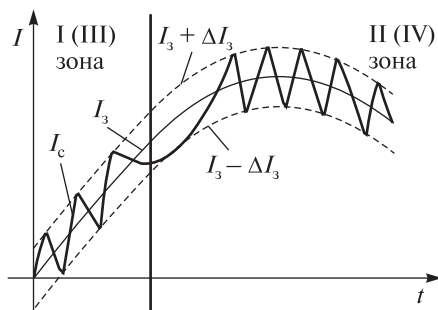


Рис. 3.18. К описанию алгоритма управления 4q-S-преобразователя

точно высокой, что приводит к увеличению в них потерь и выделяющегося тепла. Кроме того, входной ток электровоза может иметь гармоники, недопустимые с точки зрения электромагнитной совместимости, причем спрогнозировать их появление практически невозможно. Эти и ряд других недостатков делают применение такого регулирования тока вторичной обмотки трансформатора нежелательным. Поэтому для мощных 4q-S-преобразователей электровозов наибольшее распространение получил способ управления при помощи модуляции с фиксированной частотой тактового сигнала.

Так же как и в режиме управления с токовым коридором, цель регулирования состоит в том, чтобы сформировать сетевой ток (I_c) в виде синусоиды с заданным сдвигом по фазе относительно питающего напряжения (3.1). Для достижения этой цели 4q-S-преобразователь используется как автономный инвертор, формирующий напряжение заданной формы, прикладываемое к вторичной обмотке трансформатора со стороны цепи постоянного

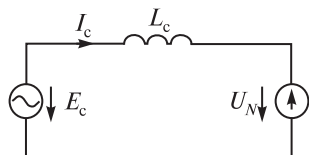


Рис. 3.19. Эквивалентная схема цепи переменного тока 4q-S-преобразователя

ного тока (нагрузки). Если пренебречь активным сопротивлением вторичной обмотки трансформатора и учитывать только наличие ЭДС и сетевого дросселя (индуктивности рассеяния), то эквивалентная схема цепи переменного тока 4q-S-преобразователя приобретает вид, показанный на рис. 3.19. В соответствии с этой схемой напряжение, приложенное к индуктивности L_c , равно

$$U_c(t) = U_N(t) - E_c(t), \quad (3.2)$$

где $U_N(t)$ — напряжение, формируемое 4q-S-преобразователем;
 $E_c(t)$ — ЭДС вторичной обмотки трансформатора.

Напряжение и ток индуктивности связаны компонентным уравнением:

$$U_{L_c}(t) = L_c \frac{d}{dt} I_c(t).$$

Ток вторичной обмотки трансформатора задается в виде (3.1). Тогда напряжение на индуктивности L_c равно

$$U_{L_c}(t) = I_{3\max} X_{L_c} \cos(2\pi f_c t + \varphi_0),$$

где $X_{L_c} = 2\pi f_c L_c$ — реактивное сопротивление индуктивности L_c на частоте сети.

ЭДС вторичной обмотки трансформатора

$$E_c(t) = E_{c\max} \sin(2\pi f_c t).$$

С учетом (3.2) можно записать выражение для напряжения, которое должен формировать 4q-S-преобразователь:

$$U_N(t) = I_{3\max} X_{L_c} \cos(2\pi f_c t + \varphi_0) + E_{c\max} \sin(2\pi f_c t)$$

или

$$U_N(t) = U_{N\max} \sin(2\pi f_c t + \psi),$$

где

$$U_{N\max} = \sqrt{\left(E_{c\max} - I_{3\max} X_{L_c} \sin \varphi_0\right)^2 + \left(I_{3\max} X_{L_c} \cos \varphi_0\right)^2};$$

$$\psi = \arctg \left(\frac{I_{3\max} X_{L_c} \cos \varphi_0}{E_{c\max} - I_{3\max} X_{L_c} \sin \varphi_0} \right) - \quad (3.3)$$

амплитудное значение и фаза напряжения, которое должен сформировать 4q-S-преобразователь для того, чтобы через индуктивность L_c протекал заданный ток.

В практически важном случае, когда сдвиг по фазе между током и напряжением равен нулю, выражения (3.3) упрощаются:

$$U_{N\max} = \sqrt{E_{c\max}^2 + \left(I_{3\max} X_{L_c}\right)^2}; \quad \psi = \arctg \left(\frac{I_{3\max} X_{L_c}}{E_{c\max}} \right).$$

В этом режиме 4q-S-преобразователь потребляет от трансформатора чисто активный ток.

Алгоритм управления транзисторами можно получить в результате сравнения модулирующего сигнала $F_M(t)$, определяющего желаемый вид выходного напряжения инвертора, и тактового сигнала $F_T(t)$, определяющего частоту переключения транзисторов.

В случае синусоидального модулирующего сигнала

$$F_M(t) = k_M \sin \omega_N t \quad (3.4)$$

и треугольного тактового сигнала

$$F(t) = \frac{2}{\pi} \arcsin \left[\sin \left(\omega_T t + \frac{\pi}{2} \right) \right], \quad (3.5)$$

сигналы на включение транзистора VT1 можно определить из выражения

$$S1 = \text{КОМП} [F_M(t) - F_T(t)],$$

где k_M , $\omega_N = 2\pi f_N$ — коэффициент модуляции и частота модулирующего сигнала;

$\omega_T = 2\pi f_T$ — частота тактового сигнала треугольной формы;

КОМП(X) — функция сравнения (компаратор):

$$\text{КОМП}(X) = \begin{cases} 1 & \text{при } X > 0, \\ 0 & \text{при } X \leq 0; \end{cases}$$

$S1$ — логическая переменная, определяющая состояние транзистора VT1 ($S1 = 1$ — транзистор включен, $S1 = 0$ — транзистор выключен).

Логическая переменная $S2$, определяющая состояние транзистора VT2, может быть найдена как инверсия логической переменной $S1$, т.е.

$$S2 = \overline{S1} = \begin{cases} 0, & \text{если } S1 = 1, \\ 1, & \text{если } S1 = 0. \end{cases}$$

Алгоритм управления транзисторами VT3 и VT4 можно получить, если в качестве модулирующего использовать сигнал

$$F'_M(t) = -F_M(t) = k_M \sin(\omega_N t - \pi),$$

который при сравнении с тактовым сигналом $F_T(t)$ позволяет определить функцию включения транзистора VT3

$$S3 = \text{КОМП} [F'_M(t) - F_T(t)]$$

и функцию включения транзистора VT4

$$S4 = \overline{S3}.$$

Диаграммы, поясняющие алгоритм получения сигналов управления транзисторами, показаны на рис. 3.20.

При управлении 4q-S-преобразователем коэффициент модуляции определяется как отношение амплитуды формируемого им напряжения к напряжению в звене постоянного тока:

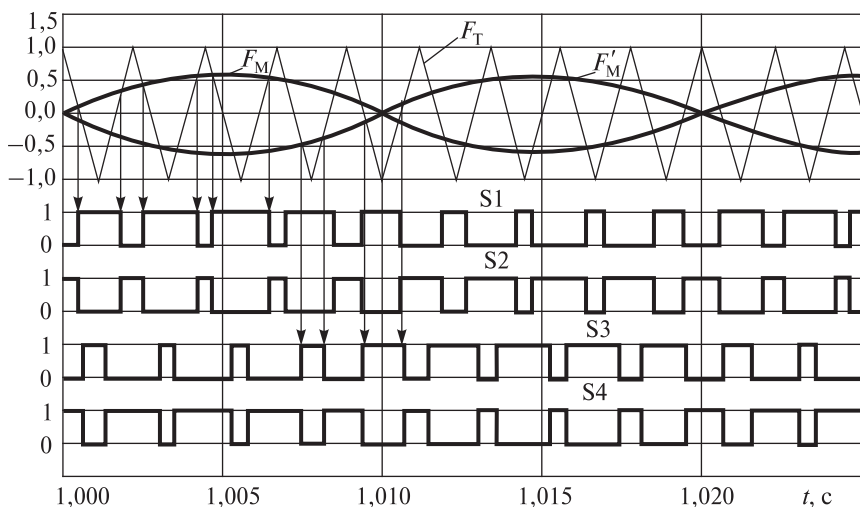


Рис. 3.20. Формирование ШИМ-сигналов управления транзисторами в режиме инвертора

$$k_M = \frac{U_{N \max}}{U_H}.$$

При условии, что $\varphi_0 = 0$, справедливо следующее выражение:

$$k_M = \frac{E_{c \max}}{U_H \cos \psi}.$$

Для описанного способа ШИМ коэффициент модуляции не может превышать 1. Поэтому напряжение в звене постоянного тока должно быть выше амплитуды напряжения вторичной обмотки трансформатора и достаточным для того, чтобы обеспечить формирование заданного тока, т.е. 4q-S-преобразователь является повышающим.

В качестве примера рассмотрим процессы в 4q-S-преобразователе, расчетная схема которого показана на рис. 3.21.

На рис. 3.22 и рис. 3.23 приведены результаты расчета токов и напряжений при следующих параметрах:

$E_c = 940$ В — напряжение тяговой обмотки трансформатора (действующее значение);

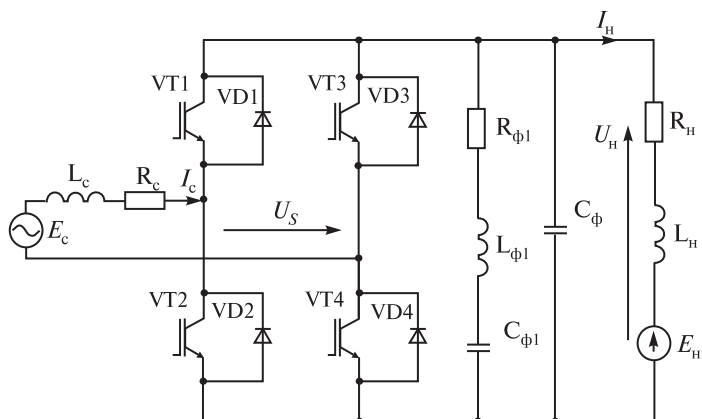


Рис. 3.21. Расчетная схема 4q-S-преобразователя

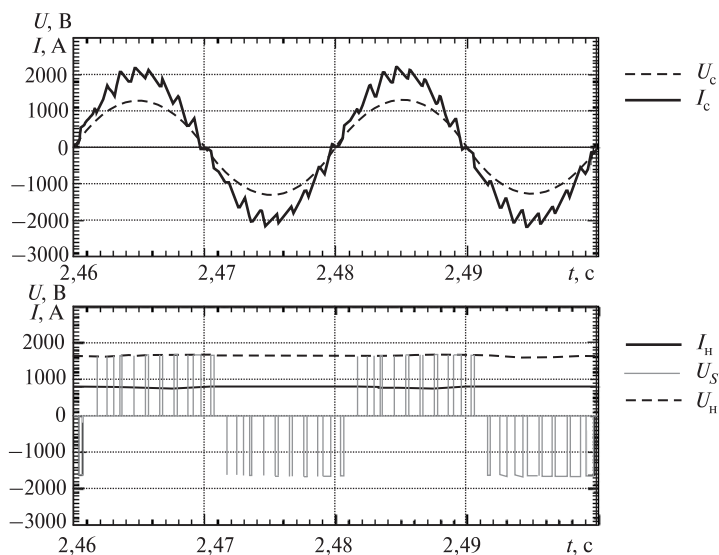


Рис. 3.22. Напряжения и токи 4q-S-преобразователя при передаче электрической энергии в цепь постоянного напряжения (режим тяги)

$L_c = 0,92$ мГн, $R_c = 0,01$ Ом — приведенные индуктивность и активное сопротивление источника переменного напряжения;

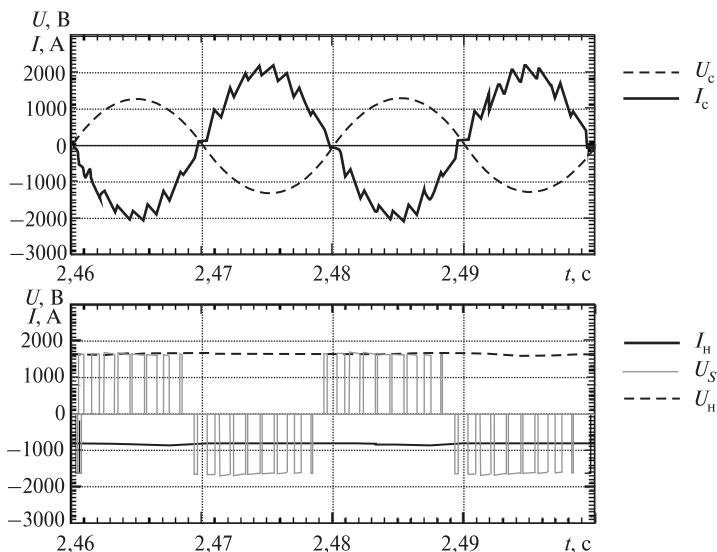


Рис. 3.23. Напряжения и токи 4q-S-преобразователя при передаче электрической энергии в цепь переменного напряжения (режим рекуперации)

$C_{\Phi} = 10 \text{ мФ}$ — емкость конденсатора фильтра;

$L_{\Phi 1} = 2,5 \text{ мГн}$, $C_{\Phi 1} = 1 \text{ мФ}$, $R_{\Phi 1} = 0,01 \text{ Ом}$ — индуктивность, активное сопротивление и емкость резонансного фильтра второй гармоники;

$L_H = 1,0 \text{ мГн}$, $R_H = 0,05 \text{ Ом}$ — приведенные к звену постоянного напряжения индуктивность и активное сопротивление АТД;

E_H — приведенная к звену постоянного напряжения ЭДС АТД;

$U_d = 1650 \text{ В}$ — заданное значение напряжения промежуточного звена постоянного напряжения;

$f_T = 450 \text{ Гц}$ — частота тактового сигнала.

Подводя итоги, можно сделать следующие выводы:

- 4q-S-преобразователь является реверсивным преобразователем и обеспечивает двухстороннюю передачу электрической энергии с любым сдвигом по фазе между током и напряжением питающей сети; может использоваться в качестве компенсатора реактивной мощности;

- в режиме рекуперации 4q-S-преобразователь следует рассматривать как автономный инвертор напряжения, работающий

на сеть переменного тока с источником переменного напряжения и имеющую индуктивное сопротивление;

— применение ШИМ с относительно невысокой частотой — до 500 Гц — обеспечивает практически синусоидальную форму сети, а коэффициент мощности в широком диапазоне изменения нагрузки близок к единице, что и определяет высокие технико-экономические показатели применения 4q-S-преобразователей на электровозах переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями.

3.3.4. Автономные инверторы напряжения

Автономный инвертор напряжения (АИН), применяемый для питания АТД, преобразует подаваемое на его вход постоянное напряжение в трехфазное переменное напряжение регулируемой частоты и величины. Существуют различные варианты схем АИН.

До появления полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов (GTO-тиристоров и IGBT-транзисторов) автономные инверторы напряжения создавались на базе однооперационных (SCR) тиристоров.

Сначала рассмотрим схемы с использованием тиристоров (инверторы с аналогичными схемами применялись на электровозах ВЛ80^А и ВЛ86^Ф). Как было сказано выше, SCR-тиристор отпирается с помощью управляющего импульса. Для запираания такого тиристора необходимо, чтобы ток в цепи анода снизился ниже тока удержания. Поэтому при создании АИН с использованием SCR-тиристоров необходимо наличие в схеме преобразователя контуров искусственной (принудительной) коммутации, обеспечивающих выполнение условия их запираания.

Известно большое количество схем искусственной коммутации, среди которых наибольшее распространение получили те, в которых для запираания тиристора подается импульс обратного тока, а затем прикладывается обратное напряжение на время, необходимое для запираания восстанавливающих свойств. Такой способ получил название импульсной коммутации.

В 60—80 гг. XX в. были разработаны различные варианты схемных решений АИН на SCR-тиристорах с контурами искусственной коммутации. В качестве примеров ниже рассмотрены две схемы с индивидуальными контурами: Мак-Меррея—Бедфорда и

Мак-Меррея. Также рассмотрена работа схемы с общей коммутирующей цепью.

В дальнейшем, при описании принципов функционирования и анализе работы рассматриваемых схем принят ряд допущений. Будем рассматривать инвертор с R—L-нагрузкой, так как этот режим работы является наиболее тяжелым для коммутирующей цепи и, кроме того, такая нагрузка является характерной для схем с двигателями переменного тока.

На рис. 3.24 показана одна ветвь мостового инвертора без элементов коммутирующей цепи. Предположим, что открыт тиристор VS1, поэтому ток протекает от положительного полюса источника к выводу А нагрузки и возвращается к отрицательному полюсу через другой открытый тиристор, который на схеме не показан. Когда процесс коммутации завершен, тиристор VS1 запирается и индуктивный ток нагрузки продолжает протекать через обратный диод VD2.

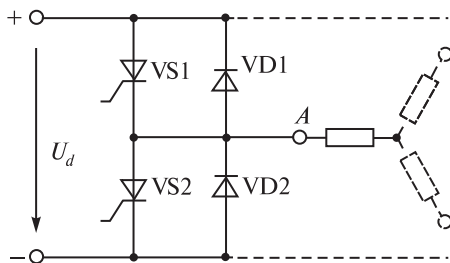


Рис. 3.24. Схема одной фазы мостового АИН

При анализе схемы вводятся также следующие допущения:

- индуктивность нагрузки достаточна для поддержания постоянства тока I_0 в течение процесса коммутации. Это допущение является приемлемым, ввиду того что процесс коммутации длится не более 10—100 мкс;

- не учитывается короткий импульс обратного тока при запираании тиристора;

- пренебрегаем временем включения тиристора, так как оно составляет всего 1—4 мкс, а скорость изменения тока определяется параметрами внешних цепей со значительно большей постоянной времени;

- прямое падение напряжения на открытом тиристоре равно нулю.

Схема Мак-Меррея—Бедфорда. На рис. 3.25 показана одна ветвь многофазного мостового инвертора, в котором используется ком-

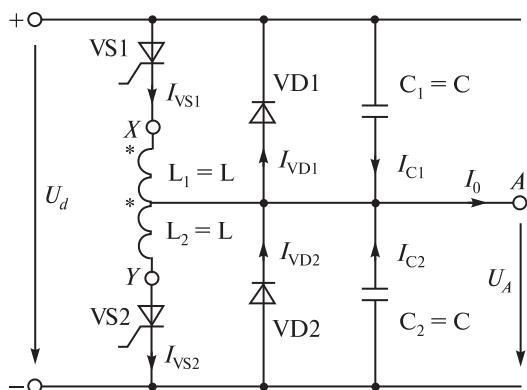


Рис. 3.25. Схема одной фазы мостового АИН, использующего метод коммутации Мак-Меррея—Бедфорда

мутация тиристоров по методу Мак-Меррея—Бедфорда. Дроссель с выводом от средней точки имеет малую индуктивность, около 50 мкГ, и предполагается, что его полуобмотки имеют полную магнитную связь. Коммутационный процесс начинается при отпирании тиристора, находящегося в одной ветви с открытым тиристором. На рис. 3.26 показаны кривые напряжений и токов для

индуктивной нагрузки. Длительность коммутационного интервала на этом рисунке условно увеличена.

Интервал А. Первоначально тиристор VS1 открыт и проводит ток нагрузки от положительного полюса источника постоянного тока. В случае нагрузки с большой индуктивностью скорость изменения тока незначительна и напряжение на коммутирующем дросселе L_1 пренебрежимо мало по сравнению с напряжением источника. Поэтому вывод А практически накоротко подключен к положительной шине источника, напряжение на конденсаторе C_1 равно нулю, а конденсатор C_2 заряжен до напряжения источника U_d .

Интервал В. Когда в первоначальный момент коммутации отпирается тиристор VS2, точка Y оказывается подключенной к отрицательной шине источника. Напряжения на конденсаторах C_1 и C_2 не могут измениться мгновенно, поэтому на полуобмотке L_2 коммутирующего дросселя появляется напряжение U_d . В полуобмотке L_1 индуцируется такое же напряжение, поэтому потенциал U_X точки X по отношению к отрицательному выводу источника возрастает до $2U_d$ (см. рис. 3.26). В результате этого к тиристоры VS1 прикладывается обратное напряжение и он запирается. Для того чтобы МДС дросселя осталась неизменной, ток нагрузки I_0 ,

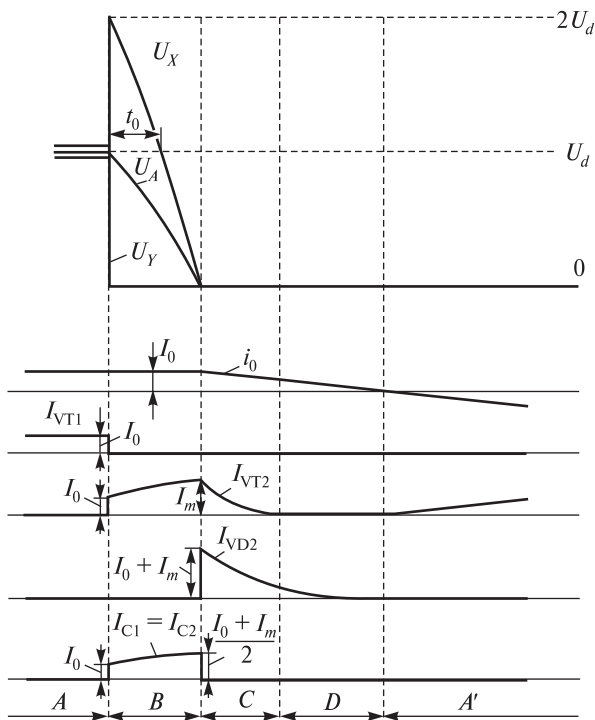


Рис. 3.26. Токи и напряжения в схеме Мак-Меррея—Бедфорда

протекавший через тиристор VS1 и полуобмотку L_1 , должен мгновенно перейти в цепь, состоящую из VS2 и L_2 . Ток I_0 , который не может измениться скачком из-за индуктивного характера нагрузки, поддерживается постоянным за счет разряда конденсаторов C_1 и C_2 . Эти начальные условия определяют последующее изменение токов и напряжений в течение коммутационного периода.

По мере разряда конденсатора C_2 падает напряжение на L_2 , вследствие чего уменьшается ЭДС, индуцированная в L_1 . Одновременно конденсатор C_1 заряжается до напряжения источника, и через короткий промежуток времени прямое напряжение тиристора VS1, формирующееся за счет C_1 становится большим обратного напряжения, подаваемого от L_1 . Если $L_1 = L_2 = L$ и $C_1 = C_2 = C$, то точные расчеты показывают, что кривая напряжения представляет

собой отрезок синусоиды с периодом, равным $2\pi/\sqrt{LC}$, и время выключения t_0 тиристора составляет менее четверти этого периода.

В течение коммутационного интервала к полуобмотке L_2 приложено напряжение конденсатора C_2 . Поэтому ток I_{VS2} увеличивается от своего первоначального значения I_0 до максимального значения I_m , когда напряжение на C_2 становится равным нулю.

Интервал С. Конденсатор C_2 теперь заряжен до напряжения источника и индуктивный ток I_0 нагрузки протекает через диод VS2, т.е. вывод A нагрузки соединен с отрицательным полюсом источника. Энергия, запасенная в L_2 , рассеивается в активных сопротивлениях за счет протекания уравнильного тока в контуре, состоящем из L_2 , VS2 и VD2. В оптимально рассчитанной схеме эта энергия минимальна, а последовательно с диодами иногда включают дополнительные резисторы, чтобы ускорить затухание уравнильного тока и тем самым уменьшить номинальные токи тиристора и диода.

Интервал D. Когда уравнильный ток спадает до нуля, коммутационный процесс заканчивается, однако диод VD2 продолжает проводить индуктивный ток нагрузки.

Интервал А'. Впоследствии ток нагрузки уменьшается до нуля и изменяет свое направление, поэтому диод VD2 запирается и ток начинает протекать через тиристор VS2, на который нужно подать повторный управляющий импульс, если первоначальный импульс, который вызвал коммутацию, был снят. При этом заканчивается переход тока от VS1 к VS2.

Схема Мак-Меррея—Бедфорда может быть усовершенствована для обеспечения возврата запасенной энергии источнику питания, что достигается за счет использования выходного трансформатора с секционными обмотками. Это увеличивает КПД инвертора, особенно при больших частотах, когда количество коммутаций в секунду является значительным. Однако включение в схему выходного трансформатора увеличивает капитальные затраты.

Схема Мак-Меррея. В схеме Мак-Меррея—Бедфорда коммутационный процесс начинается при отпирании основного тиристора. Метод Мак-Меррея использует вспомогательные тиристоры для подключения L—С-контура с высокой добротностью параллельно проводящему тиристор. На рис. 3.27 показана одна ветвь мостового инвертора, использующего этот принцип, где VS1',

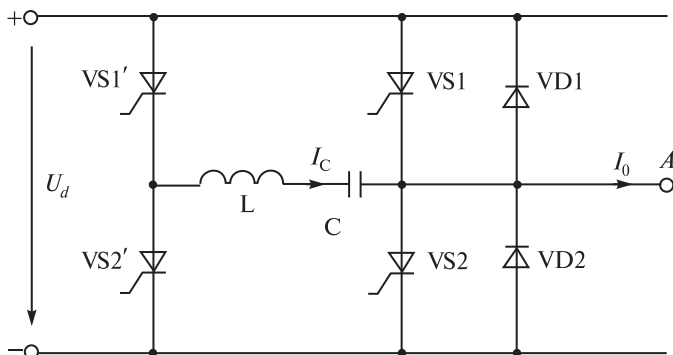


Рис. 3.27. Схема одной фазы мостового АИН, использующего метод коммутации Мак-Меррея

VS2' — вспомогательные тиристоры, используемые для коммутации основных тиристоров VS1, VS2.

Интервал А. Допустим, что открыт тиристор VS1 вследствие чего вывод А нагрузки соединен с положительной шиной источника. Конденсатор С зарядился с положительной полярностью на правой обкладке при предыдущей коммутации тиристора VS2.

Интервал В. При отпирании тиристора VS1' конденсатор разряжается через колебательный контур, состоящий из VS1', L, C и VS1. Так как в течение первого полупериода разрядный ток I_C увеличивается, это приводит к постепенному снижению тока I_{VS1} до нуля, как показано на рис. 3.28.

Интервал С. Ток I_0 поддерживается постоянным за счет индуктивности нагрузки и когда разрядный ток I_C достигает значения I_0 , его избыток протекает через обратный диод VD1. Таким образом, тиристор запирается под действием обратного напряжения, равного прямому падению напряжения на

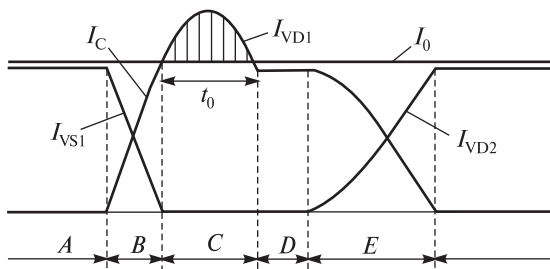


Рис. 3.28. Токи и напряжения в схеме Мак-Меррея при активно-индуктивной нагрузке

диоде (примерно 1 В). Разрядный ток возрастает до максимального значения в момент, когда напряжение на конденсаторе равно нулю, а затем уменьшается по мере заряда конденсатора в обратном направлении.

Интервал D. Когда I_C становится меньше I_0 , диод VD1 запирается и с тиристора VS1 снимается обратное напряжение. Под действием индуктивности нагрузки через VS1, L и C продолжает протекать постоянный по значению ток. При этом конденсатор C перезаряжается с обратной полярностью до напряжения U_d . Затем открывается диод VD2 и подключает вывод А к отрицательной шине источника.

Интервал E. Протекающий через реактор L ток I_0 продолжает заряжать конденсатор C до тех пор, пока запасенная в L энергия магнитного поля не преобразуется в энергию электростатического поля конденсатора. В течение этого интервала через VD2 протекает возрастающая часть тока нагрузки и процесс коммутации заканчивается, когда весь ток нагрузки замкнется через диод.

Как и ранее, ток нагрузки постепенно падает до нуля и реверсируется, вследствие чего VD2 запирается, а VS2 при наличии на нем управляющего импульса отпирается.

В схеме Мак-Меррея время выключения основного тиристора должно быть меньше интервала t_0 , в течение которого разрядный ток I_C превышает ток нагрузки I_0 . Эта схема отличается от других тем, что обратное напряжение на тиристоре не превышает 1—2 В, а обратный ток при его запираании ограничивается величиной разрядного тока.

В схеме Мак-Меррея—Бедфорда коммутирующее напряжения на тиристоре примерно равно напряжению источника, а обратный ток ограничивается индуктивностью цепи.

При холостом ходе потери на коммутацию в схеме Мак-Меррея малы, что позволяет получить высокий КПД инвертора. Напряжение на конденсаторе C в конце процесса коммутации тем выше, чем больше ток нагрузки I_0 , в связи с чем коммутирующая способность цепи возрастает с увеличением нагрузки. Схема Мак-Меррея—Бедфорда характеризуется большими потерями на коммутацию при холостом ходе инвертора, поэтому его КПД при малых нагрузках невысок.

Схема с общей коммутирующей цепью на входе инвертора. Вместо индивидуальной коммутации каждого тиристора можно осуществ-

влять коммутацию всего инвертора в целом. При таком способе отпирание очередной группы тиристоров осуществляется после запираания всех тиристоров инвертора. Этот метод получил название коммутации во входной цепи или на стороне постоянного тока. Типичная схема такого инвертора имеет вид, показанный на рис. 3.29.

При отпирании тиристора VSA конденсатор C заряжается от вспомогательного источника постоянного тока с отрицательной полярностью на верхней обкладке. Вследствие колебательного процесса на индуктивности L_A возникает перенапряжение, которое подзаряжает конденсатор выше напряжения источника. Когда необходимо осуществить коммутацию, отпирают тиристор VSC, вследствие чего к входу моста подключается противоположно заряженный конденсатор. Реакторы L_P и L_N предотвращают замыкание разрядного тока конденсатора через источник. Обратные диоды подключены непосредственно к источнику, поэтому напряжение на активно-индуктивной нагрузке не может превышать напряжение источника U_d . За счет отрицательно заряженно-

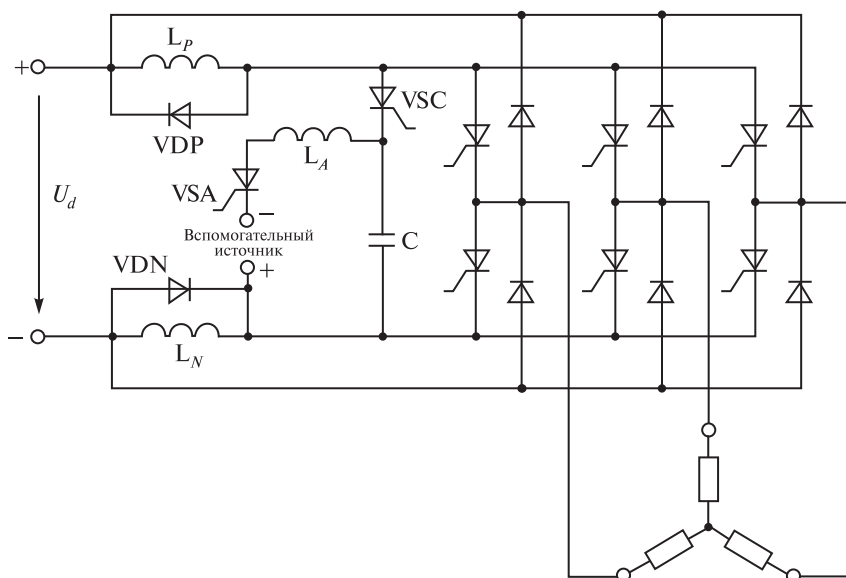


Рис. 3.29. Схема трехфазного мостового инвертора с коммутирующей цепью на его входе

го конденсатора к открытым тиристорам прикладывается обратное напряжение в течение времени, необходимого для их запираания. Конденсатор заряжается до напряжения источника U_d без колебательного процесса в цепи, так как накопленный в L_P и L_N избыток энергии рассеивается через шунтирующие диоды VDP и VDN . Тиристор VSC запирается, затем подаются управляющие импульсы на очередную группу тиристоров моста. Тиристор VSA также отпирается и заряжает конденсатор для следующей коммутации.

Схемы двух- и трехуровневых АИН. В последнее время на электровозах используются двух- и трехуровневые АИН на GTO-тиристорах и IGBT-транзисторах (электровозы ЭП10, ЭП20, 2ЭС5 и др.).

Наибольшее распространение получил трехфазный мостовой двухуровневый АИН, упрощенная принципиальная схема которого приведена на рис. 3.30. Он позволяет формировать линейное напряжение на выходе из импульсов, имеющих два уровня.

Шесть плеч АИН, состоящих из IGBT-транзисторов $VT1—VT6$ и диодов $VD1—VD6$ образуют трехфазный мост. Параллельно мосту подключен конденсатор C_Φ , выполняющий роль источника реактивной мощности, необходимой для работы инвертора на индуктивную нагрузку (в данном случае АТД). Кроме того, этот конденсатор также выполняет функции фильтра. АИН питается от источника постоянного напряжения U_H .

Трехуровневый автономный инвертор напряжения применяется на электровозах постоянного тока, так как здесь возможно использовать транзисторы на половинное напряжение контактной

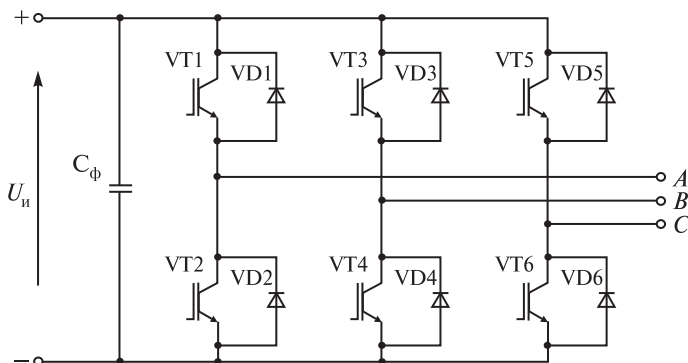


Рис. 3.30. Принципиальная схема двухуровневого АИН

сети, а не на полное, как для двухуровневого АИН. Его упрощенная принципиальная схема приведена на рис. 3.31.

Методы управления двух- и трехуровневыми АИН. Выходное напряжение АИН может быть сформировано с использованием различных принципов управления, таких как широтно-импульсное регулирование, синусоидальная широтно-импульсная модуляция, пространственно-векторная ШИМ и т.п. Вид модуляции оказывает значительное влияние на гармонический состав тока обмоток АТД, энергетические показатели системы «преобразователь—двигатель» и электровоза в целом.

С точки зрения принципов регулирования АТД, желательно увеличивать частоту модуляции АИН, что позволяет улучшить гармонический состав выходного напряжения и качество регулирования (быстродействие, характер переходных процессов и т.д.), снизить потери в АТД. С другой стороны, ограничения по массе и габаритам преобразовательной установки приводят к необходимости выбирать достаточно низкую частоту переключения СПП, что определяется условиями охлаждения.

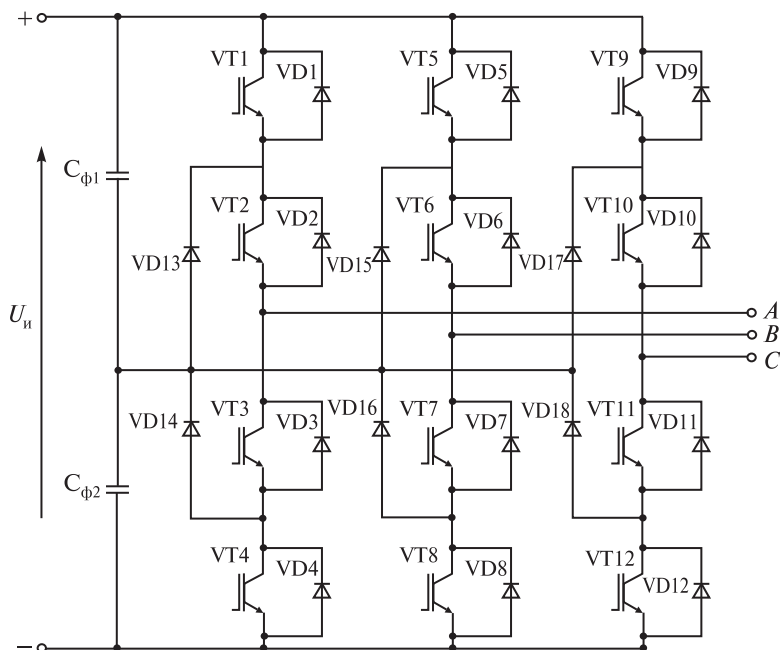


Рис. 3.31. Принципиальная схема трехуровневого АИН

Гармонический состав и частота переключения СПП АИН во многом определяются алгоритмом формирования выходного напряжения. Поэтому необходимо применение таких способов формирования выходного напряжения АИН, которые позволили бы максимально использовать напряжение источника питания, обеспечивать хороший гармонический состав выходного напряжения при минимально возможной частоте переключения СПП.

Анализ существующих методов модуляции выходного напряжения АИН показал, что использование синусоидальной ШИМ приводит к недоиспользованию инвертора по напряжению и требует достаточно большого количества переключений транзисторов, что связано с увеличением уровня потерь в СПП. Применение широтно-импульсного регулирования (ШИР) связано с ухудшением гармонического состава выходного напряжения, что нежелательно. Поэтому в настоящее время при разработке частотно-регулируемого асинхронного электропривода отказываются от этих видов модуляции и используют другие методы формирования выходного напряжения — различные варианты пространственно-векторной ШИМ.

При использовании синусоидальной ШИМ верхний и нижний транзисторы всегда коммутируются в противофазе и максимальная амплитуда выходного сигнала равна половине напряжения на звене постоянного тока $U_{и}/2$, что позволяет получить действующее значение фазного напряжения, приложенного к обмотке статора $0,354U_{и}$. Поэтому АТД оказывается недоиспользованным по напряжению. Для того чтобы увеличить напряжение, приложенное к АТД, необходимо идти на искажение формы выходного напряжения в зоне частот, близких к номинальной, т.е. переходить от синусоидальной формы выходного напряжения к трапецеидальной (в пределе — к прямоугольной). Очевидно, что такое решение приводит к искажению формы тока статора АТД и, как следствие, к ухудшению спектрального состава электромагнитного момента, что вызывает дополнительные нагрузки на элементы механической части. Кроме того, увеличиваются потери в СПП, энергетические показатели ТЭП снижаются.

Поэтому в последнее время были разработаны методы управления двух- и трехуровневыми АИН (см. рис. 3.30 и 3.31), получившие название широтно-импульсной модуляции базисных векторов (пространственно-векторная ШИМ).

Суть метода состоит в отказе от одновременной коммутации всех ключей инвертора и в переходе к коммутации между несколькими, заранее выбранными состояниями АИН, каждое из которых соответствует определенному пространственному положению вектора результирующего напряжения, приложенного к двигателю.

На рис. 3.32 показан принцип формирования базисных векторов двухуровневого АИН для положений 0 эл. градусов (рис. 3.32, а) и 60 эл. градусов (рис. 3.32, б). Состояние транзисторов инвертора описывается с помощью вектора, имеющего число компонент, равное числу фаз: $(a \ b \ c)^T$. Компоненты вектора формируются по следующему правилу: если открыт верхний транзистор фазы (VT1, VT3 или VT5), то соответствующая компонента принимает значение 1, если нижний — 0. Таким образом, вектору U_0 в положении 0 эл. градусов соответствует вектор состояния инвертора $(100)^T$ (см. рис. 3.32, а), а вектору U_{60} в положении 60 эл. градусов — $(110)^T$ (см. рис. 3.32, б).

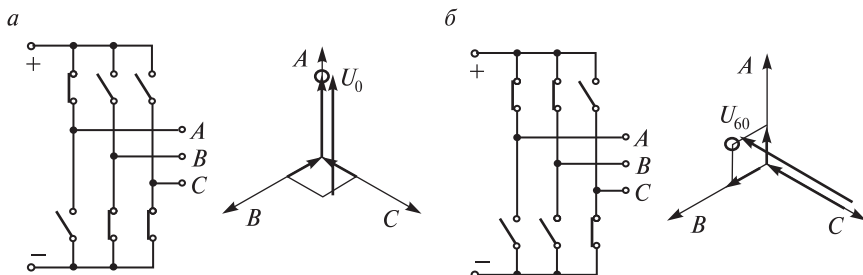


Рис. 3.32. Формирование базисных векторов двухуровневого АИН: а — для положения 0 эл. градусов; б — для положения 60 эл. градусов

Аналогично формируются векторы для положений 120, 180, 240, 300 эл. градусов, а также два нулевых вектора, составляющих наиболее часто используемый набор базисных векторов, который соответствует стандартной шеститактной коммутации. Одновременно открыты три транзистора: верхний и два нижних, либо два верхних и один нижний. На рис. 3.33 показаны базисные вектора и соответствующее им состояние транзисторов АИН для этого случая.

Линейные и фазные напряжения на нагрузке (АТД) определяются по известному вектору состояния инвертора с помощью соотношений:

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = U_{\text{и}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_{\text{и}} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}.$$

Имея восемь базисных векторов, два из которых нулевые, а остальные сдвинуты в пространстве на 60 эл. градусов, можно воспроизвести любой требуемый вектор выходного напряжения путем переключения на периоде ШИМ между двумя базисными векторами текущего сектора U_x и U_{x+60} и нулевыми векторами O_{000} и O_{111} .

Например, формирование вектора $U_{\text{вых}}$ (см. рис. 3.33) может быть осуществлено с использованием векторов U_0 , U_{60} и нулевого вектора, который выбирается из условия минимального количества переключений транзисторов.

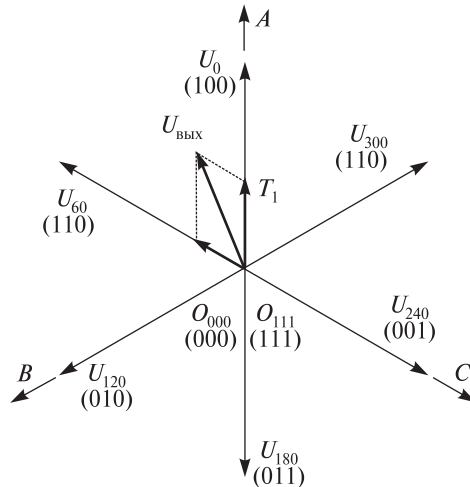


Рис. 3.33. Базисные вектора двухуровневого АИН

Время включения векторов U_0 (T_1), U_{60} (T_2) определяется по формулам:

$$\begin{aligned} T_1 &= \sqrt{2}T_{\text{ШИМ}} \|U_{\text{вых}}\| \cos(\alpha + 30^\circ); \\ T_2 &= \sqrt{2}T_{\text{ШИМ}} \|U_{\text{вых}}\| \sin(\alpha), \end{aligned} \quad (3.6)$$

где $T_{\text{ШИМ}}$ — период ШИМ;

$\|U_{\text{вых}}\|$ — длина вектора выходного напряжения;

α — угол между базисным вектором U_0 и вектором выходного напряжения.

Время включения нулевого вектора определяется следующим образом:

$$T_0 = T_{\text{ШИМ}} - T_1 - T_2,$$

при этом должно выполняться условие $T_1 + T_2 \leq T_{\text{ШИМ}}$.

В предельном случае, когда нулевые векторы не используются, годограф вектора результирующего напряжения представляет собой шестиугольник, описанный вокруг базисных векторов. С учетом того, что амплитуда базисного вектора составляет $2/3 U_{\text{и}}$, возможно формирование кругового годографа вектора результирующего напряжения с амплитудой $0,577 U_{\text{и}}$, что на 15 % больше амплитуды выходного напряжения для случая синусоидальной ШИМ. Длина вектора выходного напряжения в этом случае равна 0,866, является предельной и может быть достигнута при используемом наборе базисных векторов.

Последовательность включения базисных векторов может быть разной и определяется из условия минимизации числа переключений транзисторов и особенностями аппаратной реализации системы управления АИН. Одним из вариантов является следующая последовательность:

$$O_{000} \rightarrow U_x \rightarrow U_{x+60} \rightarrow O_{111} \rightarrow U_{x+60} \rightarrow U_x \rightarrow O_{000},$$

которая используется в секторах, ограниченных векторами $U_0 - U_{60}$, $U_{120} - U_{180}$, $U_{240} - U_{300}$, а также последовательность

$$O_{000} \rightarrow U_{x+60} \rightarrow U_x \rightarrow O_{111} \rightarrow U_x \rightarrow U_{x+60} \rightarrow O_{000}.$$

Длительность каждого включения вектора O_{000} составляет $T_0/4$, вектора O_{111} — $T_0/2$. Длительности включения векторов U_x и U_{x+60}

равны $T_1/2$ и $T_2/2$ соответственно в первой и второй половинах периода ШИМ.

Особенностью данного способа переключения базисных векторов является смена порядка обхода векторов в зависимости от сектора. При этом последовательность переключения не зависит от направления вращения вектора выходного напряжения. Другой особенностью является то, что на каждом периоде ШИМ используются оба нулевых вектора O_{000} и O_{111} , длительности включения которых одинаковы, причем период начинается и заканчивается с O_{000} .

Другой вариант переключения базисных векторов использует следующую последовательность

$$U_x \rightarrow U_{x+60} \rightarrow O_{\begin{Bmatrix} 111 \\ 000 \end{Bmatrix}} \rightarrow U_{x+60} \rightarrow U_x,$$

где нулевой вектор O_{111} используется в секторах U_0-U_{60} , $U_{120}-U_{180}$, $U_{240}-U_{300}$, а O_{000} — в секторах $U_{60}-U_{120}$, $U_{180}-U_{240}$, $U_{300}-U_0$.

Особенностью этого варианта является фиксированный порядок обхода базисных векторов вне зависимости от номера сектора. Нулевые вектора выбираются из условия минимального количества переключений транзисторов (в векторе состояния инвертора меняется одна компонента). Однако при смене направления вращения вектора выходного напряжения необходимо менять местами вектора U_x и U_{x+60} и нулевой вектор.

Одним из важнейших достоинств пространственно-векторной ШИМ является уменьшение числа переключений с шести до четырех на одном периоде ШИМ и сокращение динамических потерь в ключевых элементах инвертора.

Для иллюстрации описанных принципов управления АИН с использованием пространственно-векторной ШИМ были выполнены расчеты процессов в двухуровневом АИН. При этом была использована система базисных векторов, соответствующая шеститактной коммутации инвертора (см. рис. 3.33). В качестве нагрузки инвертора был использован АТД НТА-1200.

Моделирование проводилось при следующих параметрах:

$U_{\text{и}} = 3000$ В — напряжение источника питания;

$R_{\text{и}} = 0,005$ Ом — внутреннее сопротивление источника питания;

$C_{\phi} = 13\,600$ мкФ — емкость конденсатора фильтра;

$f_{и} = 65,3$ Гц — частота выходного напряжения;

$\|U_{\text{вых}}\| = 0,866$ — длина вектора выходного напряжения;

$T_{\text{ШИМ}} = 1/(36 f_{и})$ — период ШИМ (36 положений вектора выходного напряжения на один период);

$s = 1,03\%$ — скольжение АД.

На рис. 3.34 показаны графики линейного (U_{AB}) и фазного напряжения (U_A) на выходе АИН и фазного тока АД (I_A), полученные в результате моделирования.

Анализ полученных результатов показал, что использование пространственно-векторной ШИМ, реализованной в соответствии с описанными выше принципами, позволяет получить трехфазную регулируемую по величине и частоте систему напряжений на выходе АИН, в полной мере отвечающую сформулированным выше требованиям к преобразователю частоты и числа фаз с точки зрения реализации подхода к регулированию АД. Необходимо также отметить меньшее количество переключений СПП при одном и том же периоде модуляции по сравнению с другими способами формирования напряжения на выходе АИН.

Для управления трехуровневым АИН возможно по аналогии с двухуровневым инвертором использовать про-

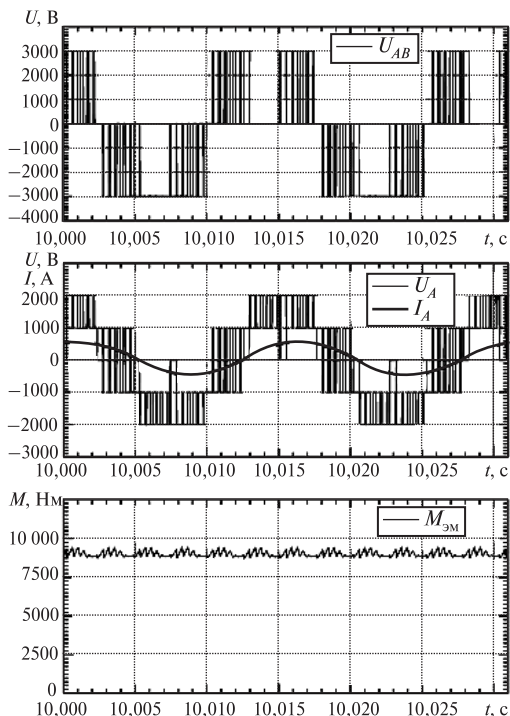


Рис. 3.34. Напряжения, ток двухуровневого АИН и электромагнитный момент АД при использовании пространственно-векторной ШИМ

пространственно-векторную ШИМ. При этом верхние и нижние пары транзисторов, относящихся к одной фазе (например, VT1, VT2 и VT3, VT4 соответственно для фазы A), переключаются одновременно и позволяют получить одну из систем базисных векторов, описанных выше. Однако особенности схемотехники трехуровневого преобразователя дают возможность реализовать другой вариант пространственно-векторной ШИМ, имеющий лучшие показатели.

Особенностью трехуровневого АИН является то, что в каждой из точек A , B , C (см. рис. 3.31) могут быть получены три уровня напряжения: $-U_{и}/2$, 0 , $-U_{и}$ (относительно точки соединения конденсаторов $C_{\phi 1}$ и $C_{\phi 2}$) в зависимости от того, какая пара транзисторов включена. Поэтому компоненты вектора состояния инвертора могут принимать три значения:

2, если открыты два верхних транзистора в фазе (например, VT1, VT2 для фазы A);

1 — если открыты два средних (например, VT2, VT3 для фазы A);

0 — два нижних (например, VT3, VT4 для фазы A).

Тогда, по известному вектору состояния инвертора, фазные и линейные значения выходного напряжения на нагрузке определяются как:

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \frac{U_{и}}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \frac{1}{6} U_{и} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}.$$

В отличие от двухуровневого АИН, где базисные векторы имеют одинаковую длину и могут быть получены единственным способом, трехуровневый АИН позволяет использовать для их формирования половину напряжения источника питания $U_{и}$ (питание первого уровня). В этом случае базисные векторы будут иметь модуль в 2 раза меньший, чем у двухуровневого АИН. При этом фор-

мирование вектора половинной длины может быть осуществлено при питании как от верхнего, так и от нижнего конденсатора. Это позволяет регулировать потенциал точки соединения конденсаторов и выравнивать напряжение на них, что особенно важно в динамических режимах работы тягового электропривода.

При питании первого уровня от верхнего конденсатора используются два уровня напряжения — $U_{и}/2$ и ноль, получаемые открытием двух верхних и двух средних транзисторов в фазе соответственно. На рис. 3.35 показан пример формирования базисных векторов трехуровневого АИН при питании первого уровня от верхнего конденсатора. На рис. 3.35, а вектор выходного напряжения $U_{вых}$ имеет положение 0 эл. градусов. Ему соответствует вектор состояния инвертора $(211)^T$. На рис. 3.35, б показано формирование вектора для положения 60 эл. градусов, вектор состояния инвертора — $(221)^T$.

В случае когда реализуется питание первого уровня от нижнего конденсатора, используются уровни напряжения 0 и $-U_{и}/2$, получаемые с помощью коммутации двух средних и двух нижних транзисторов фаз инвертора. На рис. 3.36 показано формирование базисных векторов трехуровневого АИН при питании первого уровня от нижнего конденсатора. На рис. 3.36, а вектор выходного напряжения $U_{вых}$ занимает положение 0 эл. градусов, ему соответствует вектор состояния инвертора $(100)^T$. На рис. 3.36, б показано формирование вектора для положения 60 эл. градусов, вектор состояния инвертора — $(110)^T$.

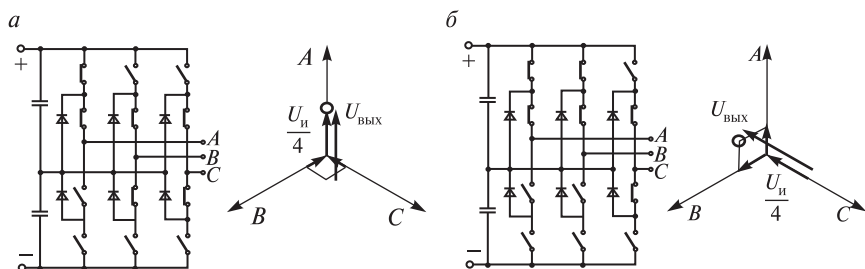


Рис. 3.35. Формирование базисных векторов трехуровневого АИН при питании первого уровня от нижнего конденсатора: а — для положения 0 эл. градусов; б — для положения 60 эл. градусов

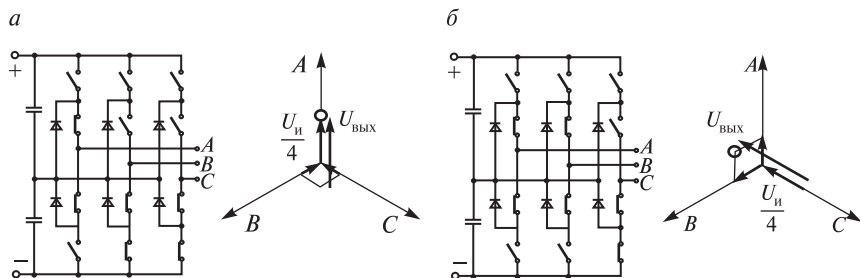


Рис. 3.36. Формирование базисных векторов трехуровневого АИН при питании первого уровня от верхнего конденсатора: *а* — для положения 0 эл. градусов; *б* — для положения 60 эл. градусов

При необходимости получения базисных векторов максимальной длины применяется питание второго уровня, когда используется полное напряжение источника питания. В этом случае уровни напряжения $U_{и}/2$ и $-U_{и}/2$ получаются включением верхней и нижней пар транзисторов фаз инвертора. На рис. 3.37, *а* показано формирование базисного вектора трехуровневого АИН при питании второго уровня для положения 0 эл. градусов (вектор состояния инвертора $(200)^T$), на рис. 3.37, *б* — вектора для положения 60 эл. градусов (вектор состояния инвертора $(220)^T$).

Базисные векторы могут быть получены также с помощью разноточной коммутации, когда используются все три уровня напряжения. Получаемые при этом вектора сдвинуты на 30 эл. градусов относительно векторов при питании первого и второго уровней, что позволяет получить необходимое количество комбинаций

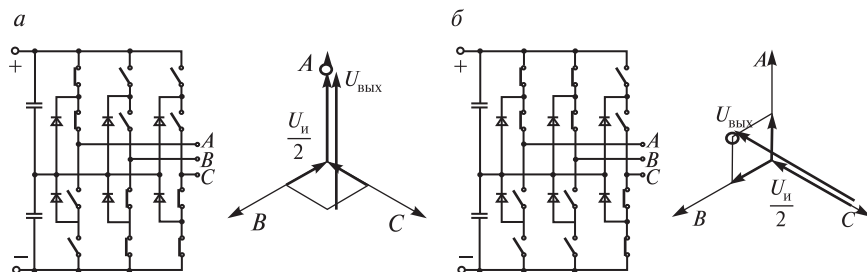


Рис. 3.37. Формирование базисных векторов трехуровневого АИН при питании второго уровня: *а* — для положения 0 эл. градусов; *б* — для положения 60 эл. градусов

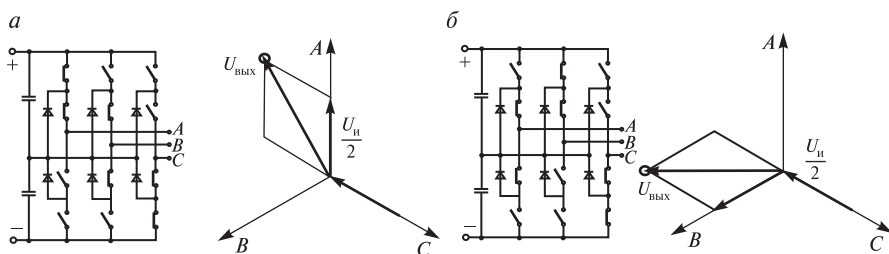


Рис. 3.38. Формирование базисных векторов трехуровневого АИН при разнополярной коммутации: *а* — для положения 30 эл. градусов; *б* — для положения 90 эл. градусов

включения векторов для формирования выходного напряжения и улучшить его спектральный состав. На рис. 3.38 показано формирование базисных векторов трехуровневого АИН при разнополярной коммутации: для положений 30 эл. градусов (вектор состояния инвертора $(210)^T$) и 90 эл. градусов (вектор состояния инвертора $(210)^T$).

Векторы, получаемые при питании первого и второго уровня и разнополярной коммутации, дополненные тремя нулевыми векторами $(000)^T$, $(111)^T$ и $(222)^T$, создают систему базисных векторов трехуровневого АИН. На рис. 3.39 показана их векторная диаграмма и приведено состояние транзисторов инвертора. Верхний вектор состояния соответствует питанию от верхнего конденсатора, нижний — от нижнего.

Приведенные на рис. 3.39 базисные векторы образуют шесть секторов, каждый из которых может быть разделен на четыре области. На рис. 3.40 приведены области первого сектора. Формирование векторы выходного напряжения осуществляется с помощью пяти векторов v_1 — v_5 , которым в первом секторе соответствуют векторы $(211)^T$, $(200)^T$, $(210)^T$, $(221)^T$ и $(220)^T$ — при питании от верхнего конденсатора, и $(100)^T$, $(200)^T$, $(210)^T$, $(110)^T$ и $(220)^T$ — от нижнего. Вектор v_0 выбирается из условия минимального количества переключений транзисторов инвертора. Для остальных секторов базисные векторы формируются аналогично.

Из приведенного на рис. 3.40 распределения по областям базисных векторов первого сектора видно, что в первой области вектор выходного напряжения формируется векторами v_1 , v_2 и v_3 , во вто-

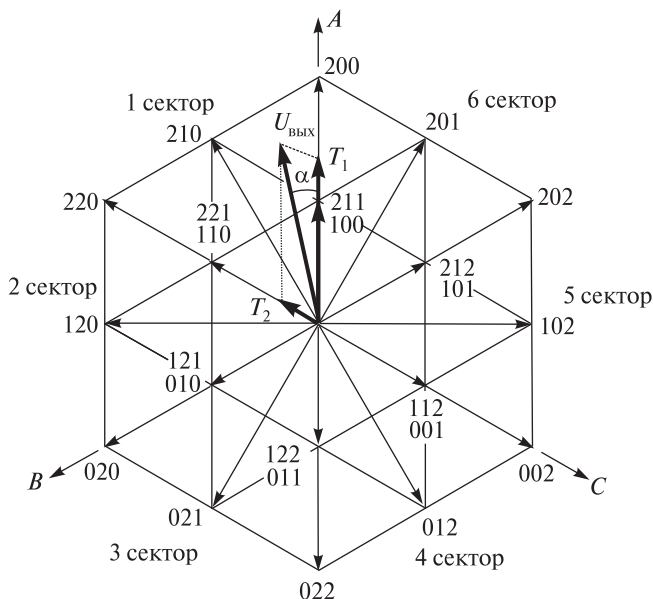


Рис. 3.39. Базисные вектора трехуровневого АИН

рой — v_1 , v_3 и v_4 , в третьей — v_3 , v_4 и v_5 , в четвертой — v_0 , v_1 и v_4 . Таким образом, разность между двумя последовательно включаемым векторами в 2 раза меньше, чем у двухуровневого инвертора, что существенно снижает уровень высших гармонических составляющих выходного напряжения. Другим преимуществом данного варианта пространственно-векторной ШИМ является то, что нулевые вектора используются только в одной из областей сектора.

В зависимости от величин проекций T_1 и T_2 вектора выходного напряжения $U_{\text{вых}}$, для расчета которых используются формулы (3.6), номер области внутри сектора определяется с помощью критериев, приведенных в табл. 3.3. Время включения работающих базисных векторов рассчитывается по формулам, приведенным здесь же.

Порядок обхода базисных векторов определяется исходя из тех же соображений, что и для двухуровневого АИН. При этом главным критерием является получение минимально возможного количества переключений, для чего необходимо, чтобы при переходе от одного базисного вектора к другому происходило одно включение и одно выключение СПП. В зависимости от особенностей ап-

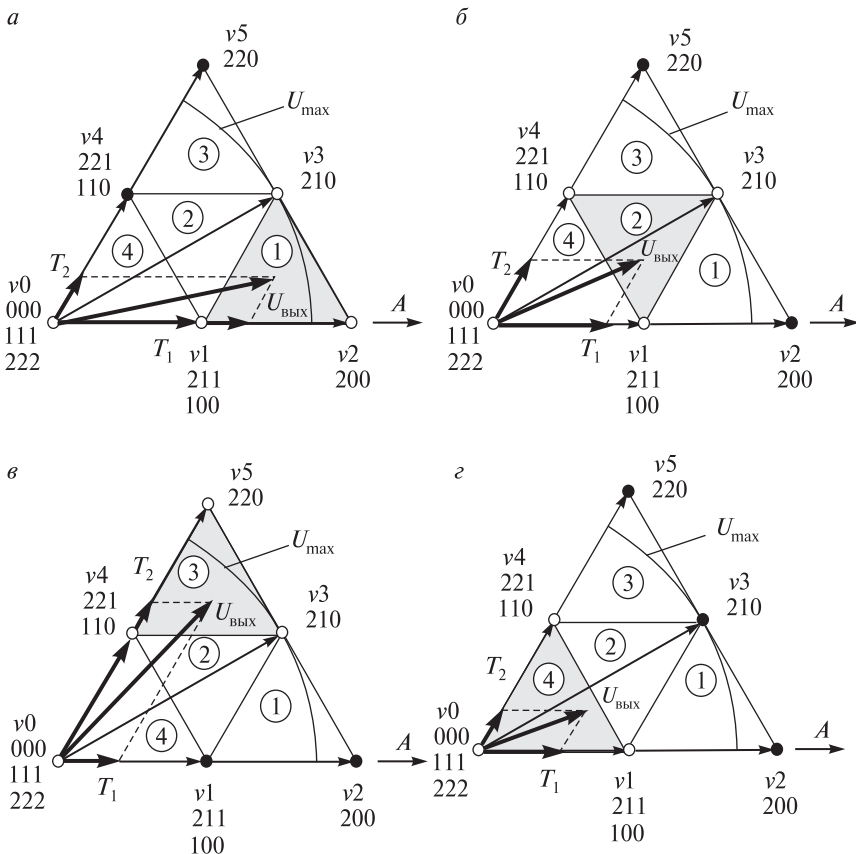


Рис. 3.40. К расчету времени включения базисных векторов трехуровневого АИН в первой (а), второй (б), третьей (в) и четвертой (г) областях

паратной реализации системы управления инвертором могут быть использованы разные последовательности переключения.

Равенство напряжений на конденсаторах $C_{\phi 1}$ и $C_{\phi 2}$ (см. рис. 3.31) является одним из условий нормальной работы трехуровневого АИН, поскольку значительная разница между ними приводит к нарушению системы базисных векторов, ухудшает гармонический состав выходного напряжения и в динамических режимах может привести к потере управления инвертором. Значительное неравенство напряжений приводит также к увеличению напряжения, прикладываемого к части транзисторов, что может вызвать их про-

бой. Поэтому необходимо обеспечивать равенство напряжений с точностью не хуже 0,5—1 % от величины питающего напряжения.

Таблица 3.3

Расчет времени включения базисных векторов для различных областей текущего сектора

Номер области	Критерий идентификации	Скважность включения базисных векторов
1	$T_1 > 0,5$	$t_1 = 2(T_1 - T_2)$ $t_2 = 2T_1 - 1$ $t_3 = 2T_2$
2	$T_1 \leq 0,5$ $T_2 \leq 0,5$ $(T_1 + T_2) > 0,5$	$t_1 = 1 - T_2$ $t_3 = 2T_1 + 2T_2 - 1$ $t_4 = 1 - 2T_1$
3	$T_2 > 0,5$	$t_3 = 2T_1$ $t_4 = 2(T_1 - T_2)$ $t_5 = 2T_2 - 1$
4	$T_1 \leq 0,5$ $T_2 \leq 0,5$	$t_0 = 1 - 2T_1 - 2T_2$ $t_1 = 2T_1$

Описанный выше вариант пространственно-векторной ШИМ позволяет, как указывалось ранее, обеспечить питание как от верхнего, так и от нижнего конденсатора, что дает возможность выполнить стабилизацию напряжения на конденсаторах. При этом питание осуществляется от того конденсатора, напряжение которого больше. В режимах, близких к установившимся, целесообразно чередовать питание от верхнего и нижнего конденсатора при переходе от одного сектора к другому: например, в первом секторе осуществлять питание от верхнего конденсатора, во втором — от нижнего и т.д. Это позволяет выровнять нагрузку на них в течение периода и снизить разность напряжений.

Приведем пример, иллюстрирующий применение описанного способа построения пространственно-векторной ШИМ для уп-

равления трехуровневого АИН. Было выполнено математическое моделирование процессов в таком АИН (нагрузкой являлся АТД НТА-1200). При моделировании были приняты следующие параметры АИН и режима работы:

$U_{\text{и}} = 3000 \text{ В}$ — напряжение источника питания;

$R_{\text{и}} = 0,005 \text{ Ом}$ — внутреннее сопротивление источника питания;

$C_{\text{ф1}} = C_{\text{ф2}} = 6600 \text{ мкФ}$ является емкостью конденсаторов фильтра;

$f_{\text{и}} = 65,3 \text{ Гц}$ — частота выходного напряжения;

$\|U_{\text{вых}}\| = 0,866$ — длина вектора выходного напряжения;

$T_{\text{ШИМ}} = 1/(36 f_{\text{и}})$ — период ШИМ (36 положений вектора выходного напряжения на один период);

$s = 1,03\%$ — скольжение АТД;

$\Delta U_{\text{C}} = 20 \text{ В}$ — допустимая разница напряжений конденсаторов $C_{\text{ф1}}$ и $C_{\text{ф2}}$.

На рис. 3.41 приведены кривые линейного (U_{AB}) и фазного (U_{A}) напряжения на выходе трехуровневого АИН, фазного тока АТД (I_{A}) и потенциала общей точки конденсаторов $C_{\text{ф1}}$ и $C_{\text{ф2}}$ ($\varphi_{\text{Cф1}, \text{Cф2}}$), полученные в ходе моделирования. Частота переключения транзисторов

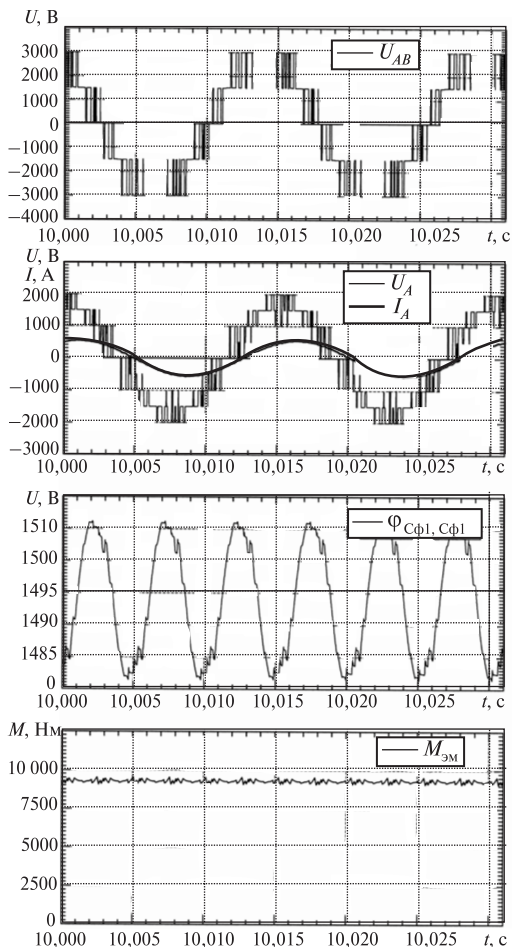


Рис. 3.41. Напряжения, ток, потенциал общей точки конденсаторов трехуровневого АИН и электромагнитный момент АТД при использовании пространственно-векторной ШИМ

инвертора при выбранном режиме работы и параметрах регулирования не превышает 500 Гц.

3.3.5. Автономные инверторы тока

До освоения производства мощных полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов (ГТО-тиристоров и IGBT-транзисторов) на тяговом подвижном составе в качестве преобразователя частоты и числа фаз для питания АТД в ряде случаев использовались автономные инверторы тока (АИТ) на базе однооперационных тиристоров (SCR). По сравнению со схемами АИН с искусственной коммутацией они имеют более простую схему на аналогичной элементной базе. В отечественной практике АИТ использовались в составе электрической передачи тепловоза ТЭМ21 (см. ниже п. 3.4.2) и тягового электропривода электропоезда ЭНЗ.

АИТ представляет собой преобразователь электроэнергии постоянного тока в энергию переменного тока, источник питания на входе которого имеет значительную индуктивность, обеспечивающую постоянство (непрерывность) потребляемого тока. В дальнейшем при описании принципов управления АИТ будет считаться, что на входе АИТ установлена индуктивность бесконечной величины, а ток — постоянный.

Схема АИТ (рис. 3.42) включает трехфазный мост, составленный из тиристоров $VS1—VS6$, коммутирующих конденсаторов $C_1—C_6$, отсекающих диодов $VD1—VD6$ и RL -нагрузку. Коммутирующие конденсаторы выполняют функцию источников напряжения, прикладываемого в обратном направлении к тиристорам во время выключения, и обеспечивают обмен реактивной энергией с индуктивностью нагрузки. Особенностью АИТ является то, что в процессе коммутации конденсаторы C_1 , C_3 , C_5 и C_2 , C_4 , C_6 включены в контур тока в виде двух параллельных цепей.

Управление АИТ осуществляется следующим образом. Пусть на некотором интервале времени открыты (проводят ток) тиристоры $VS1$ и $VS2$ и необходимо перевести ток с тиристора $VS1$ на $VS3$, т.е. закрыть тиристор $VS1$ и открыть тиристор $VS3$. До начала коммутации конденсатор C_1 заряжен так, что его правая обкладка положительна, а конденсатор C_5 заряжен с обратной полярностью. Конденсатор C_3 разряжен. Ток нагрузки постоянен, протекает по цепи $VS1$, $VD1$, L_A , R_A , R_C , L_C , $VD2$, $VS2$ и равен току источника

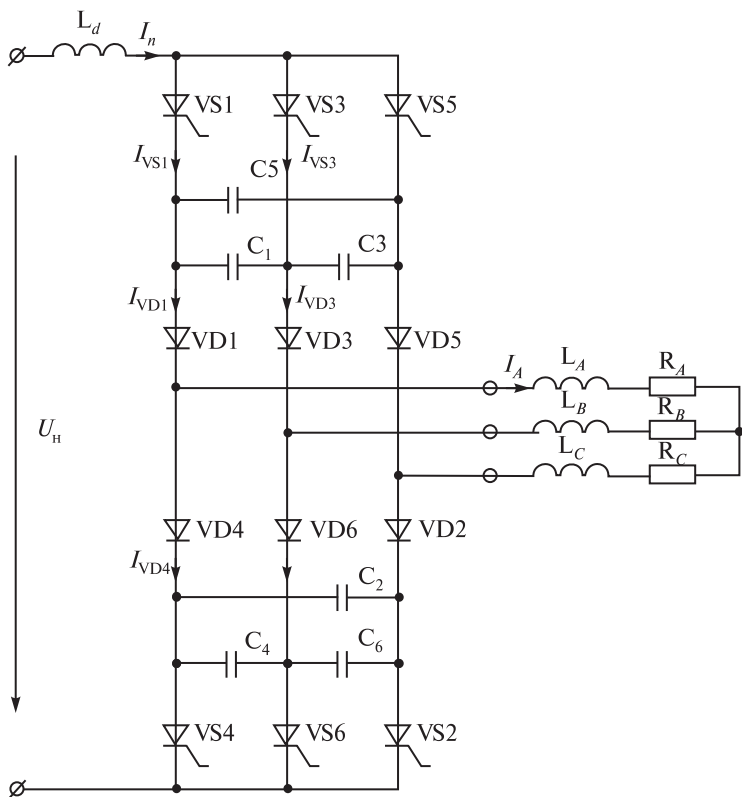


Рис. 3.42. Схема трехфазного АИТ с отсекающими диодами

$I_n = \text{const}$. Напряжение на выходе АИТ в этом режиме определяется падением напряжения в активных сопротивлениях фаз нагрузки. Временные диаграммы токов и напряжений АИТ приведены на рис. 3.43.

После включения тиристора VS3 конденсатор C_1 подключается к VS1 и запирает его обратным напряжением. Ток нагрузки переводится в цепь VS3. Ток тиристора VS3 $I_{VS3} = I_n$ разделяется в отношении 2/3 и 1/3 между конденсаторами C_1 и C_3 , C_5 (предполагается, что $C_1 = C_3 = C_5$). Постоянным током $2I_n/3$ линейно разряжается конденсатор C_1 (интервал времени ωt_q на рис. 3.43). При этом через отсекающий диод VD3 ток не протекает до тех пор, пока напряжение на конденсаторе C_1 не станет ниже паде-

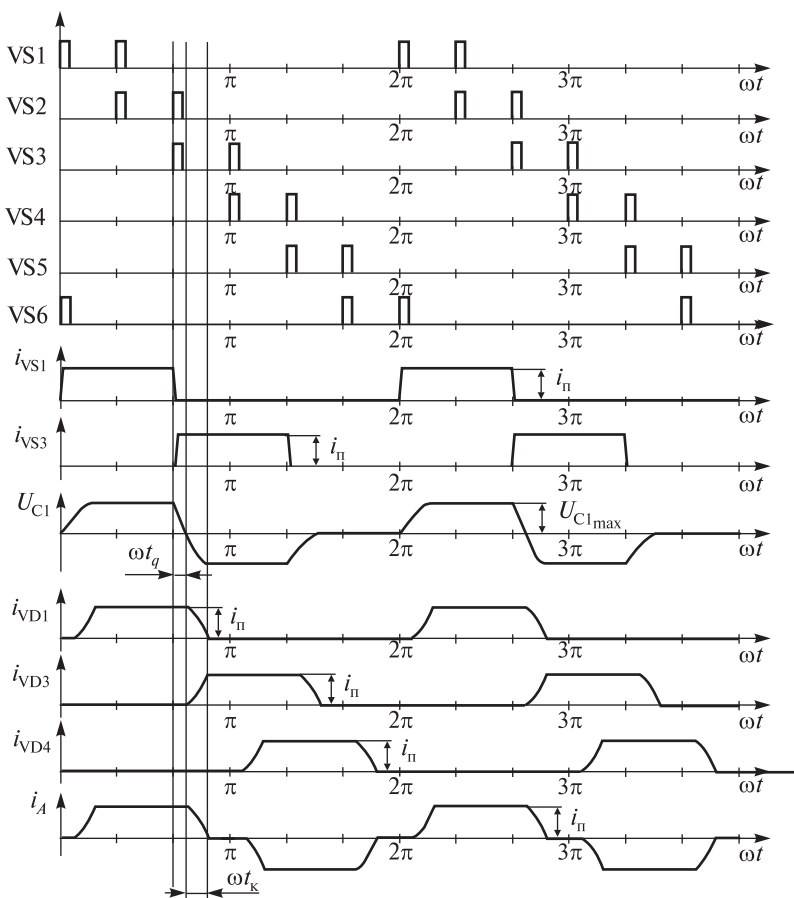


Рис. 3.43. Временные диаграммы работы АИТ

ния напряжения на активном сопротивлении фазы нагрузки. При дальнейшем снижении напряжения на конденсаторе C_1 потенциал анода VD3 становится положительным, диод открывается и его ток нарастает от нуля до значения I_n (см. рис. 3.43, интервал времени ωt_k). Ток диода VD1 уменьшается от значения I_n до нуля. Сумма токов i_{VD1} и i_{VD3} равна току звена постоянного тока I_n :

$$i_{VD1} + i_{VD3} = 3i_{C1}/2 + I_n - 3i_{C1}/2 = I_n.$$

Коммутация закончится, когда $i_{VD1} = 0$, а $i_{VD3} = I_n$.

Коммутация проходит в две ступени: практически мгновенно-го переключения тока в тиристорах и постепенного переключения тока в цепи нагрузки. Коммутирующий конденсатор должен иметь достаточную емкость, чтобы время его разряда на интервале ωt_q , предусмотренное для запираания тиристора, было больше, чем время, необходимое для выключения применяемого типа тиристора. Напряжение, на которое заряжается коммутирующий конденсатор по окончании коммутации, определяется значением тока I_n , индуктивностью и другими параметрами нагрузки. Процессы при коммутации других тириستоров происходят аналогично.

АИТ, применяемый для питания АТД, имеет ряд недостатков. Одним из них является необходимость регулирования тока на входе преобразователя при наличии значительной индуктивности в звене постоянного тока. Это обстоятельство накладывает ограничения на быстродействие регулирования тока, а, следовательно, и электромагнитного момента АТД. Другим недостатком является достаточно большая длительность второго интервала коммутации, когда происходит заряд коммутирующего конденсатора. Длительность этого интервала зависит от емкости конденсаторов, величины переключаемого тока, параметров нагрузки и ограничивает максимальную частоту выходного тока нагрузки инвертора. Кроме того, в процессе коммутации на элементах схемы АИТ возникают значительные перенапряжения. Также следует отметить то обстоятельство, что по сравнению с АИН на полностью управляемых силовых полупроводниковых приборах, АИТ с отсекающими диодами имеет большую массу и габариты. По указанным причинам на перспективном подвижном составе железных дорог в составе тягового электропривода АИТ не используется.

3.3.6. Пример конструкции тягового преобразователя электровоза

На электровозе двойного питания ЭП10 установлены три тяговых преобразователя типа UM2423-2812. Обозначение типа преобразователя расшифровывается следующим образом:

- U — преобразователь с промежуточным звеном постоянного тока;
- M — предназначен для работы на электровозах двойного питания;
- 2 — схема входного преобразователя: двухпозиционные парные ветви;
- 4 — количество фаз входного преобразователя;
- 2 — схема выходного преобразователя: двухпозиционные парные ветви;

3 — количество фаз выходного преобразователя;
 28 — номинальное напряжение промежуточного звена постоянного тока — 2800 В;

12 — номинальный ток промежуточного звена постоянного тока — 1200 А.

Каждый преобразователь рассчитан на питание двух параллельно включенных АТД НТА-1200 суммарной мощностью на валах до 2500 кВт. Преобразователь выполнен на GTO-тиристорах, рассчитанных на напряжение 4,5 кВ и ток 3 кА. В состав преобразователя входят фазовые модули типа ZV24-2830U, ZV24-2830L, BV24-2830L.

Силовые модули занимают примерно 15 % объема преобразователя. Около 30 % объема приходится на фильтровые конденсаторы, а остальная часть — на коммутационную аппаратуру, датчики, блок управления тяговым приводом, формирователи импульсов управления тиристорами, часть оборудования контура охлаждения и шинный монтаж. Преобразователь имеет габариты 3000×1060×2087 мм, массу 3000 кг. Система охлаждения — жидкостно-воздушная, охлаждающая жидкость — деионизированная, дистиллированная вода или этиленгликоль. Номинальное количество охлаждающей жидкости — 98 дм³.

Технические данные преобразователя

А. При работе на переменном напряжении:

Вход преобразователя

Номинальное напряжение, В	U_{ACn}	2×1157
Номинальный ток, А	I_{DCn}	2×1155
Номинальная мощность на входе, кВт	P_{ACn}	2673
Максимальная мощность на входе, кВт	P_{AC}	3000
Номинальная частота сети, Гц	f_r	50

Звено постоянного тока

Номинальное напряжение, В	U_{dn}	2800
Номинальная емкость, мФ	C_{dn}	13,2

Режекторный фильтр

Номинальная емкость, мФ	C_{SKn}	5,06
Номинальная индуктивность, мГн	L_{SKn}	0,5
Резонансная частота, Гц	f_{SK}	100

Выход преобразователя

Номинальное линейное напряжение, В	U_{ACn}	1×2183
Номинальный фазный ток, А	I_{ACn}	1×750

Номинальная мощность, кВт	P_{ACn}	1×2500
Частота номинального режима АТД, Гц	f_{Mn}	64
Диапазон частоты основной гармоника двигателя, Гц	f_M	0—130

Мощность потерь преобразователя

Номинальная величина при номинальной мощности, кВт	P_{VSRn}	86
--	------------	----

Б. При работе на постоянном напряжении:

Вход преобразователя

Номинальное напряжение, В	U_{DCn}	3000
Номинальный ток, А	I_{DCn}	880
Номинальная мощность на входе (включая преобразователь собственных нужд), кВт	P_{ACn}	2673
Резонансная частота входной цепи, Гц	f_r	< 11

Промежуточное звено постоянного тока

Номинальное напряжение, В	U_{dn}	3000
Номинальная емкость, мФ	C_{dn}	8,4

Выход преобразователя

Номинальное линейное напряжение, В	U_{ACn}	2×1169
Номинальный фазный ток, А	I_{ACn}	2×702
Номинальная мощность, кВт	P_{ACn}	2×1250
Частота номинального режима АТД, Гц	f_{Mn}	68
Диапазон частоты основной гармоника двигателя, Гц	f_M	0—130

Мощность потерь преобразователя

Номинальная величина при номинальной мощности, кВт	P_{VSRn}	20
--	------------	----

Компоненты и аппараты тягового преобразователя UM2423-2812, за несколькими исключениями, помещаются в каркасе из нержавеющей материалов (рис. 3.44, *а* и *б*). Каркас закрыт снаружи щитами для защиты от прикосновения. На рис. 3.44, *а*, *б*, преобразователь изображен без щитов, на рис. 3.44, *в*, *г*, показан общий вид и унифицированные модули этого преобразователя.

На рис. 3.44 использованы следующие обозначения элементов тягового преобразователя:

A2x	Фазовые модули
A2xx	Драйверы
A08	Блок питания драйверов
A011	Устройство управления приводом

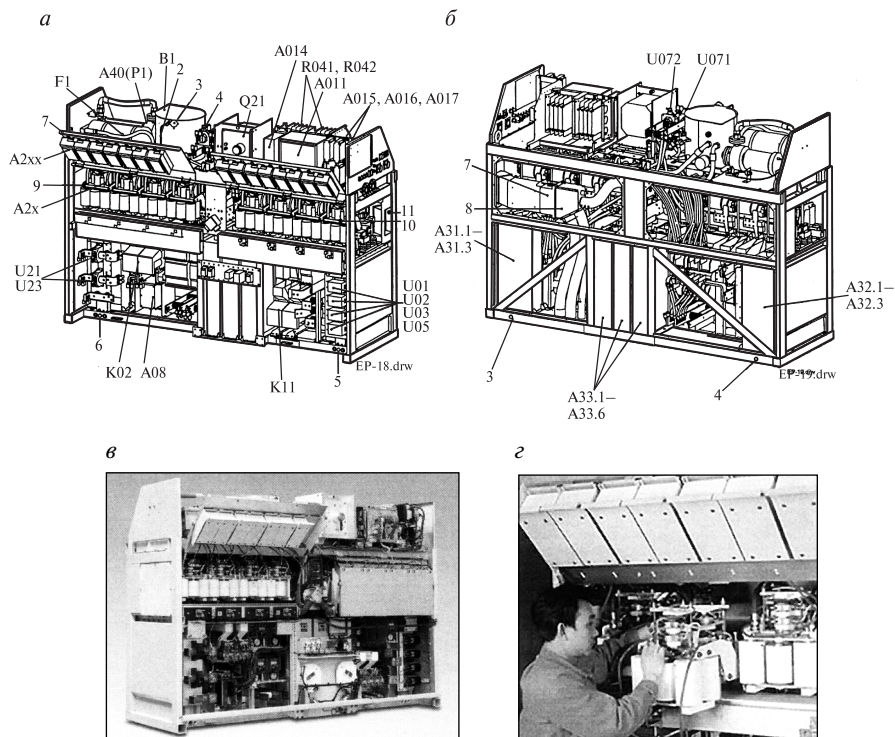


Рис. 3.44. Тяговый преобразователь UM2430-2812: *а* — вид со стороны прохода; *б* — вид со стороны наружной стены локомотива; *в* — общий вид; *г* — унифицированные модули преобразователя

A014	Блок питания
A015	Аналоговый модуль ввода и вывода
A016, A017	Цифровой модуль ввода-вывода
A40	Насос охлаждающей жидкости
K02	Линейный контактор постоянного тока
K11	Отключающий контактор переменного тока
Q21	Заземлитель с индикатором напряжения
R041	Зарядный реостат переменного тока
R042	Зарядный реостат постоянного тока
U01, U02, U03	Датчик напряжения звена постоянного тока

U05	Датчик напряжения устройства защиты от замыкания на землю
U21, U23	Датчики тока двигателей
B1	Расширительный бак системы жидкостного охлаждения
2	Указатель уровня охлаждающей жидкости
3	Байонетное соединение (рис. 3.44, а)
4	Кран слива охлаждающей жидкости (рис. 3.44, а)
5, 6	Отверстия для прижимов блока преобразователя
7	Крышка отсека с драйверами (рис. 3.44, а)
F1	Фильтр охлаждающей жидкости
9, 10	Нижняя и верхняя шины постоянного напряжения фазовых модулей
11	Подключение вентиляции
A31.1—A31.3	Конденсаторная батарея промежуточного звена постоянного тока
A32.1—A32.3	Конденсаторная батарея режекторного фильтра; Датчики защиты от перенапряжений Отверстия для прижимов (рис. 3.44, б) Центробежный фильтр (рис. 3.44, б).
A33.1—A33.6	
U071, U072	
3, 4	
7	

3.4. Тяговые генераторы и преобразователи тепловозов

3.4.1. Синхронные тяговые генераторы

На опытном маневровом тепловозе ТЭМ21-001 с электрической передачей переменного тока установлен синхронный тяговый генератор со вспомогательной обмоткой типа ГСТ 1050-1000-УХЛ2 (рис. 3.45), основные параметры которого приведены в табл. 3.4.

Генератор тепловоза имеет в своем составе три статорных обмотки — две тяговые и одну вспомогательную. Расчетный режим работы — продолжительный.

Полюса ротора имеют моноблочную конструкцию и крепятся выступами сердечников в форме «ласточкиного хвоста» в пазах магнитопровода ротора. Сердечники полюсов ротора с катушками объединены в моноблоки при помощи технологии «Монолит-2». Класс нагревостойкости полюсных катушек ротора — F, обмоток статора — H.

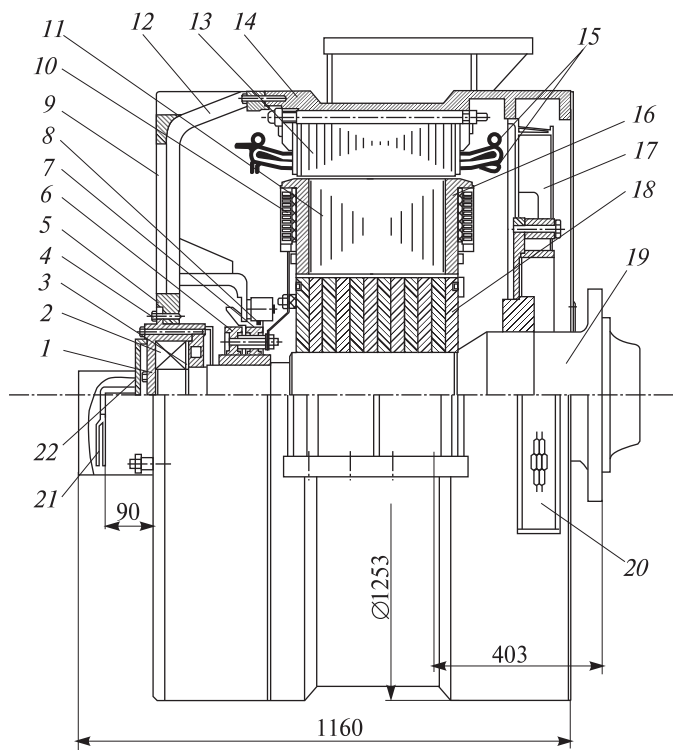


Рис. 3.45. Продольный разрез генератора ГСТ 1050-1000-УХЛ2: 1 — диск упорный; 2 — подшипник; 3 — кольцо уплотнительное; 4 — ступица; 5, 22 — задняя и передняя крышки подшипника; 6 — кольцо контактное; 7 — щетка; 8 — щеткодержатель; 9 — сетка; 10 — катушка полюса; 11 — полюс; 12 — щит подшипниковый; 13 — сердечник статора; 14 — корпус статора; 15 — обмотка статора; 16 — щека полюса; 17 — вентилятор; 18 — магнитопровод; 19 — корпус ротора; 20 — сетка; 21 — выводы обмоток генератора

Таблица 3.4

Основные параметры генератора ГСТ 1050-1000-УХЛ2

Параметр	Тяговые обмотки (номинальные данные)	Вспомогательная обмотка (номи- нальные данные)
1	2	3
Мощность номинальная, кВт	1050	70
Соединение обмоток	Две трехфазные «звезды», сдвинутые на 30 эл. град.	«Звезда»

1	2	3
Линейное напряжение, В	1000 / 505	400
Ток фазы, А	2×340 / 2×750	200
Номинальная частота, Гц	100	100
Коэффициент мощности, о.е.	0,9 / 0,8	0,5
КПД с учетом потерь во вспомогательной обмотке, о.е	0,94/ 0,945	—
Частота вращения, об/мин	1000	
Максимальное значение выпрямленного напряжения, В	1350	—
Ток возбуждения наибольший, А	190	
Масса, кг	4500	

Обмотка статора имеет девять выводов фаз и три вывода нулевых точек. Выводы фаз тяговых обмоток выполнены шинами, выводы нулевых точек тяговых обмоток — кабелями. Выводы вспомогательной обмотки статора и обмотки возбуждения ротора выполнены в виде контактных резьбовых соединений.

Способ охлаждения генератора — самовентилиация.

Основными характеристиками при регулировании тягового генератора на тепловозе являются нагрузочные характеристики.

Нагрузочные характеристики тягового генератора ГСТ 1050-1000-УХЛ2 (зависимости линейного напряжения $U_{\text{л}}$ от тока возбуждения $I_{\text{в}}$) при различных токах нагрузки представлены на рис. 3.46.

Синхронный тяговый агрегат АСТГ2-2800/400-1000-У2 предназначен для комплектации дизель-генераторов шестиосных магистральных грузовых тепловозов с электрической передачей переменного тока, в частности тепловоза 2ТЭ25А-001 «Витязь». Агрегат используется для питания асинхронных тяговых двигателей через тяговый статический преобразователь частоты, а также питания систем самовозбуждения и энергопотребителей вспомогательных систем тепловоза.

Агрегат (рис. 3.47 и 3.48) представляет собой две электрические синхронные машины переменного тока, явнополюсные, с независимым возбуждением, скомпонованные в одном корпусе. Исполнение агрегата — защищенное, вентиляция — принудительная

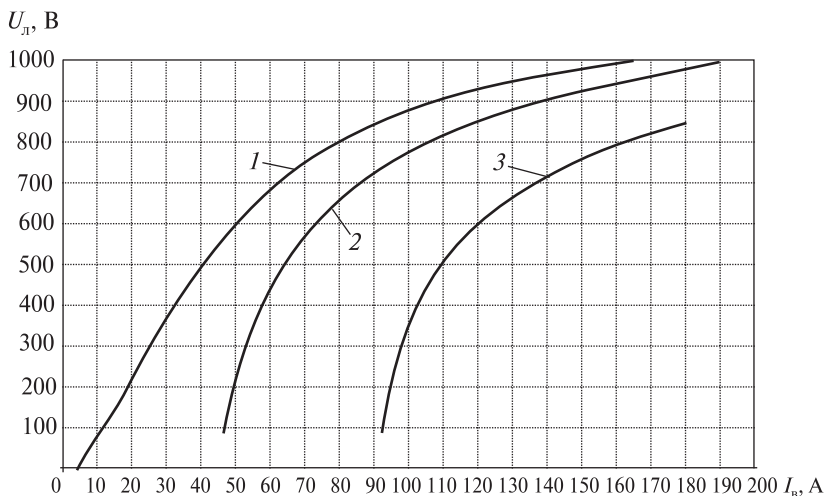


Рис. 3.46. Нагрузочные характеристики тягового генератора ГСТ 1050-1000-УХЛ2 при токах нагрузки, А: 1 — 0; 2 — 340; 3 — 750

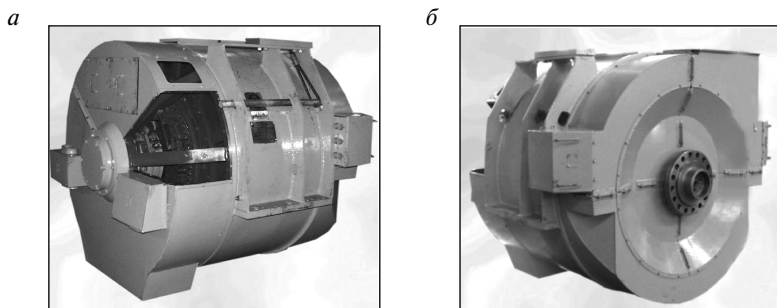


Рис. 3.47. Агрегат синхронный тяговый АСТГ2-2800/400-1000-У2: а — вид со стороны подшипникового щита; б — вид со стороны привода

нагнетательная. Расчетный режим обеих электрических машин — продолжительный.

Статоры тягового и вспомогательного генераторов агрегата монтируются в корпусе, имеющем опорные лапы для установки агрегата на поддизельной раме в кузове тепловоза. Роторы тягового и вспомогательного генераторов расположены на одном валу.

Класс нагревостойкости изоляции обмоток статора тягового и вспомогательного генераторов, а также катушек ротора — Н, контактных колец — F.

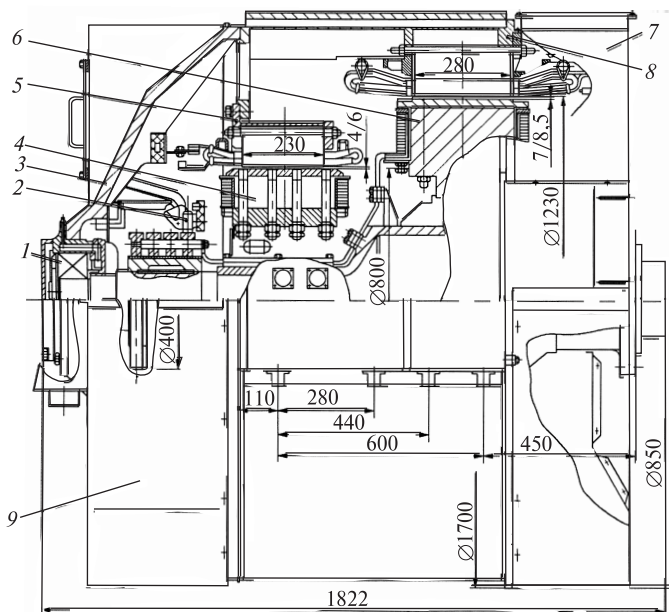


Рис. 3.48. Продольный разрез синхронного тягового агрегата АСТГ2-2800/400-1000-Y2: 1 — подшипник; 2 — щеткодержатель; 3 — щит подшипниковый; 4 и 5 — ротор и статор вспомогательного генератора; 6 и 8 — ротор и статор тягового генератора; 7 и 9 — патрубки для входа и выхода охлаждающего воздуха

Агрегат имеет двадцать выводных концов, предназначенных для подключения агрегата к электрическим цепям тепловоза:

- обмотка статора тягового генератора выполнена в виде двух трехфазных «звезд», сдвинутых относительно друг друга на 30 эл. градусов, и имеет шесть выводов фаз и два вывода от нулевых точек;

- обмотка статора вспомогательного генератора выполнена в виде двух трехфазных «звезд», сдвинутых относительно друг друга на 30 эл. градусов, и имеет также шесть выводов фаз и два вывода от нулевых точек;

- обмотки возбуждения тягового и вспомогательного генераторов имеют по два вывода.

Для контроля температуры нагрева обмоток статоров тягового и вспомогательного генераторов в пазах между катушками установ-

ливаются термопреобразователи — сопротивления, сигналы которых используются для системы регулирования расхода охлаждающего агрегат воздуха и в диагностических целях.

Основные параметры агрегата АСТГ2-2800/400-1000-У2 приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Основные параметры синхронного тягового агрегата АСТГ2-2800/400-1000-У2

Параметр	Тяговый генератор		Вспомогательный генератор	
	Номин. значение	Значение в режиме работы на тепловозе 2ТЭ25А	Номин. значение	Значение в режиме работы на тепловозе 2ТЭ25А
Мощность, кВт	2800	2300	400	400
Линейное напряжение, В	1450	1450	400	400
Ток, А	2×606	2×498	2×490	2×490
Номинальная частота вращения, об/мин	1000	1000	1000	1000
Номинальная частота, Гц	100	100	100	100
КПД, %, не менее	95,5	95,5	91,0	91,0
Коэффициент мощности, о.е.	0,92	0,92	0,6	0,6
Максимальное значение выпрямленного напряжения, В	1890	1890	—	—
Ток возбуждения в продолжительном режиме (наибольший), А	180	169	120	120
Расход охлаждающего воздуха, м ³ /с	4,5	4,0	—	—
Перепад напора охлаждающего воздуха на агрегате, Па	2000	1600	—	—
Масса агрегата, кг	7350			

Нагрузочные характеристики тягового генератора агрегата АСТГ2-2800/400-1000-У2 (зависимости линейного напряжения U_L

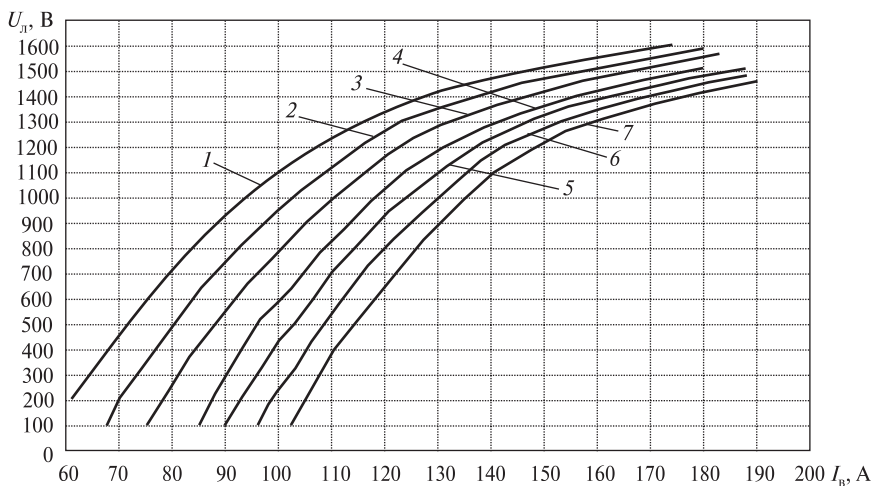


Рис. 3.49. Нагрузочные характеристики тягового генератора агрегата АСТГ2-2800/400-1000-У2 при $\cos \varphi = 0,92$ и токах нагрузки, А: 1 — 420; 2 — 475; 3 — 530; 4 — 605; 5 — 625; 6 — 660; 7 — 700

от тока возбуждения I_B) при различных токах нагрузки представлены на рис. 3.49.

В качестве дополнительных данных в табл. 3.6 приведены индуктивные сопротивления статорных обмоток тяговых генераторов тепловозов ТЭМ21-001 и 2ТЭ25А-001 в номинальных длительных режимах работы.

Таблица 3.6

**Индуктивные сопротивления обмоток тягового генератора
ГСТ 1050-1000 УХЛ2 и тягового генератора агрегата АСТГ2-2800/400-1000 У2**

Параметр	Тип тягового генератора	
	ГСТ 1050-1000-УХЛ2	АСТГ2-2800/400-1000-У2
1	2	3
Индуктивное сопротивление по продольной оси, X_d , о.е.	0,571	1,152
То же, по поперечной оси, X_q , о.е.	0,316	0,758
Переходное индуктивное сопротивление по продольной оси, $X_{d'}$, о.е.	0,226	0,514

1	2	3
То же, по поперечной оси, $X_{q'}$, о.е.	0,316	0,758
Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси, $X_{d''}$, о.е.	0,196	0,514
Индуктивное сопротивление обратной последовательности, X_2 , о.е.	0,215	0,253
То же, нулевой последовательности, X_0 , о.е.	0,111	0,159
Базовое значение сопротивления $Z_0 = U_{\phi} / 2I_{\phi}$, Ом	0,337	0,690

3.4.2. Преобразователи тепловозов

Тяговые преобразователи тепловозов включают выпрямительное устройство и инвертор. В качестве инверторов применяются либо автономные инверторы тока (АИТ), выполняемые обычно на однооперационных тиристорах, либо автономные инверторы напряжения (АИН) на полностью управляемых GTO-тиристорах или IGBT-транзисторах.

На опытном маневровом тепловозе ТЭМ21 применен преобразователь, выполненный на основе АИТ. Структурная схема электрической тяговой передачи тепловоза ТЭМ21 представлена на рис. 3.50.

Асинхронные тяговые двигатели попарно подключены к статическим преобразователям частоты. Каждый статический преобразователь состоит из трехфазного управляемого выпрямителя (УВ) и автономного инвертора тока (АИТ), а также блока замыкающих тиристоров (БЗТ), подключающего тормозные резисторы в режиме тормоза и режиме нагружения дизеля на тормозной реостат. Вентилятор охлаждения резисторов питается от части нагрузочно-го реостата (двигатель М1).

Работа тяговой электропередачи происходит следующим образом: синхронный тяговый генератор (СГ), имеющий две тяговые обмотки и обмотку для вспомогательных нужд, работает на самовозбуждении с помощью управляемого выпрямителя (В-ТПЕ), который обеспечивает оптимальное отношение напряжения и

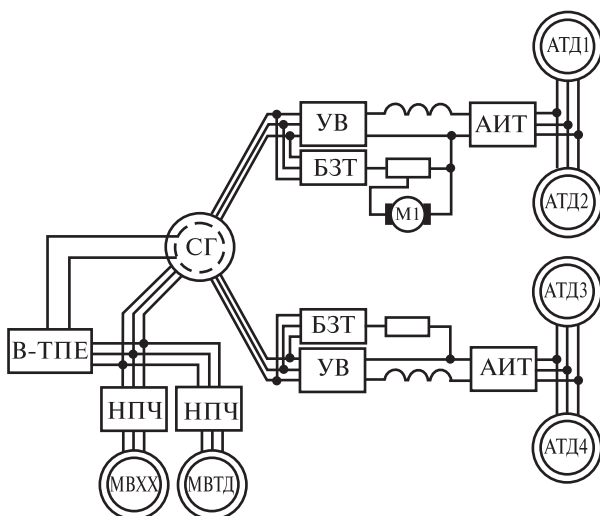


Рис. 3.50. Структурная схема электрической передачи тепловоза ТЭМ21

частоты U/f на вспомогательной обмотке. К вспомогательной обмотке через непосредственные трехступенчатые преобразователи частоты (НПЧ) подключены асинхронные двигатели вентиляторов холодильной камеры (МВХХ) и охлаждения тяговых двигателей (МВТД).

Статические преобразователи частоты служат для регулирования частоты и амплитуды питающего напряжения АТД при их работе как в режиме тяги, так и в режиме электрического торможения. Реверсирование тяговых двигателей осуществляется изменением последовательности чередования фаз тока, питающего АТД. Особенностью тяговой схемы является полное отсутствие контактной коммутационной аппаратуры, что делает передачу необслуживаемой и долговечной.

Схема АИТ на однооперационных тиристорах с цепями принудительной коммутации и отсекающими диодами, примененного на тепловозе ТЭМ21, приведена на рис. 3.51.

Насыщающиеся дроссели $L_1—L_6$ обеспечивают снижение скорости нарастания силового тока в первоначальный момент включения тириستоров, предотвращая тем самым локальный перегрев

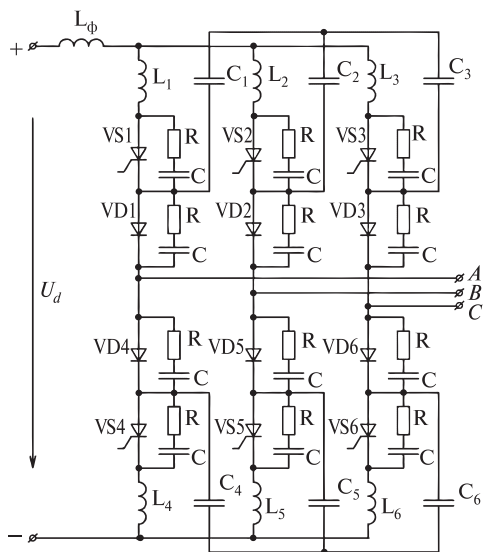


Рис. 3.51. Схема АИТ тягового привода тепловоза ТЭМ 21



Рис. 3.52. Общий вид тягового преобразователя тепловоза ТЭМ21

кристалла тиристоров. Время задержки нарастания тока определяется скоростью раскрытия полупроводниковой структуры тиристора по всему объему кристалла. Коммутирующие емкости $C_1—C_6$ выбираются из условия обеспечения запаса времени на гарантированное выключение тиристоров на всех частотах работы АИТ. Регулируемое напряжение U_d на входе данного АИТ поступает от тиристорного управляемого выпрямителя.

Способ регулирования выходного напряжения — комбинированный. При низкой частоте выходного напряжения (примерно до 10 Гц) напряжение на выходе регулируется как путем изменения величины выпрямленного напряжения U_d , так и за счет ШИМ-модуляции (по трапецеидальному закону). На высокой частоте ШИМ-модуляция отключается. Из-за наличия объемного дросселя L_ϕ , высоких пульсаций выходного тока, неполной управляемости силовых ключей и интенсивного энергообмена между большим числом накопителей реактивной энергии, вводимых в схему для улучшения характеристик, а также из-за зависимости параметров ТП от параметров двигателя данное схмотехническое решение не находит широкого практического применения.

Общий вид тягового преобразователя тепловоза ТЭМ21 (без силового дросселя) приведен на рис. 3.52, его основные характеристики — в табл. 3.7. Изготовитель преобразователя — ОАО «Электро-выпрямитель», г. Саранск.

В настоящее время на тепловозах с электрической передачей переменного тока устанавливаются преобразователи на базе АИН, выполненные на высоковольтных IGBT-транзисторах.

Таблица 3.7

**Технические характеристики тягового преобразователя
тепловоза ТЭМ21**

Параметр	Значение
Входное фазное напряжение, В	660
Частота входного напряжения, Гц	100
Выходное фазное напряжение, В	680
Выходная мощность, кВт	1300
Габаритные размеры шкафа силового, мм:	
длина	950
глубина	460
высота	2000
Масса, кг, не более	750
Габаритные размеры шкафа реактора, мм:	
длина	950
глубина	370
высота	1350
Масса, кг, не более	940

В рамках концепции на использование IGBT-транзисторов в тяговом приводе остается открытым вопрос о структуре АИН. Его можно выполнить как по двух-, так и по трехуровневым схемам (см. п. 3.3.4). Обе схемы имеют свои достоинства и недостатки, поэтому однозначного решения на современном этапе развития силовой полупроводниковой техники дать невозможно.

На рис. 3.53 приведена структурная схема тягового преобразователя М-ТЗТП-Т-1-У2 тепловоза 2ТЭ25А-001. Схема выполнена на основе двухуровневого АИН с использованием IGBT-транзисторов 33-го класса (используются транзисторы фирм Еурес и Mitsubishi).

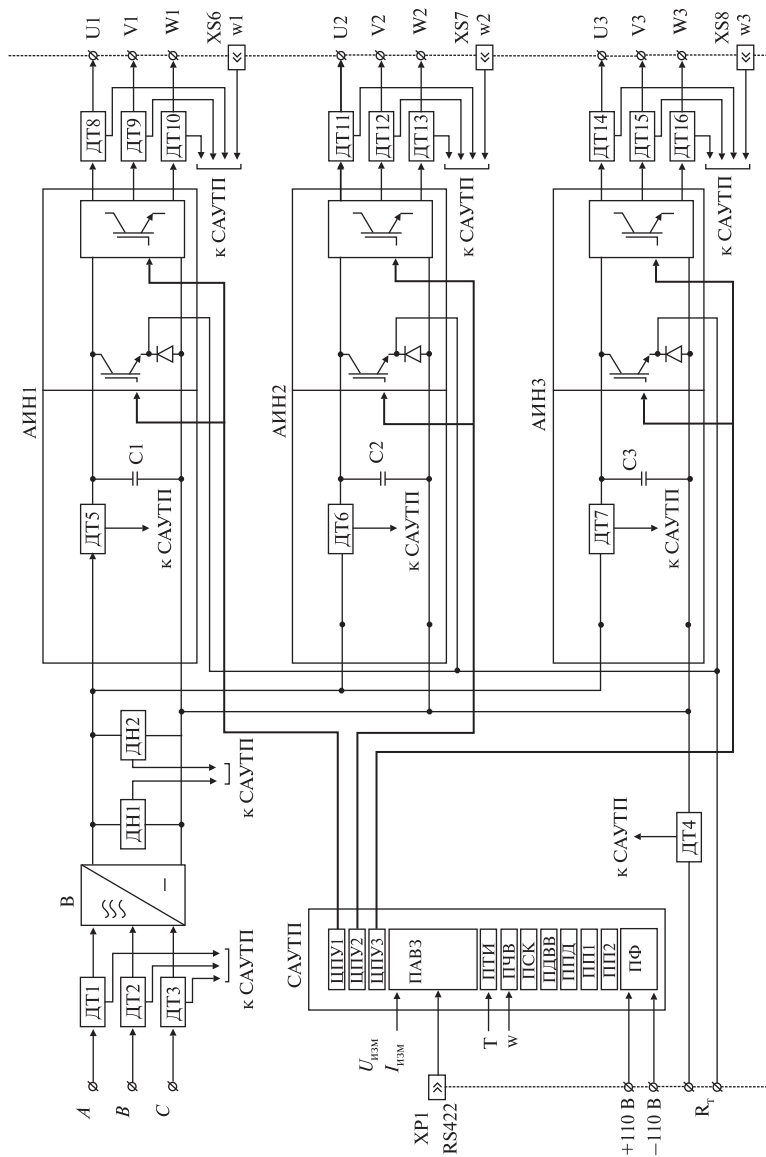
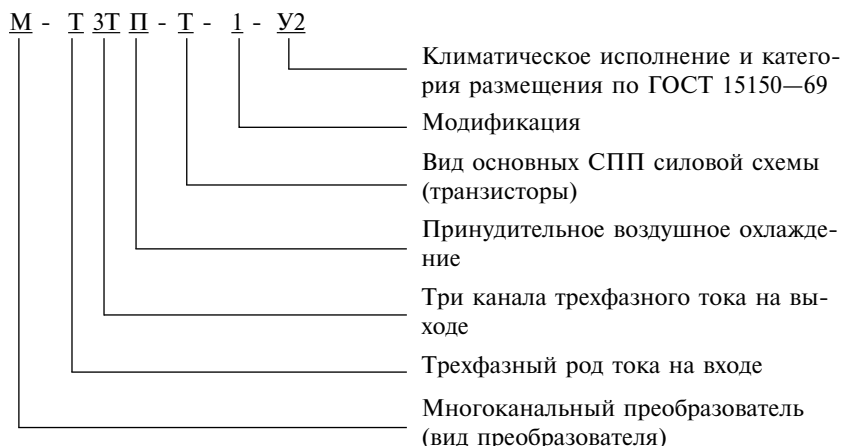


Рис. 3.53. Структурная схема тягового преобразователя М-ТЗТП-Т-1-У2 тепловоза 2Т925А

Структура условного обозначения преобразователя по ГОСТ 26284—84:



Преобразователь разрешается эксплуатировать в следующих условиях:

- воздействие климатических факторов внешней среды по ГОСТ 15150—69, исполнение У2;
- температура окружающей среды от -50 до $+60$ °С;
- температура охлаждающего воздуха от -50 до $+45$ °С;
- температура хранения от -40 до $+60$ °С.

Преобразователь состоит из следующих основных узлов:

- неуправляемого трехфазного выпрямителя (В);
- трех автономных инверторов напряжения (АИН1—АИН3);
- тормозного регулятора (VT1—VT3);
- комплекта измерительных датчиков тока (UA), напряжения (UV), цепей защиты и управления;
- системы автоматического управления тяговым преобразователем (САУТП).
- разъединителя на входе выпрямителя (на схеме не показан).

Преобразователь обеспечивает следующие основные режимы работы тепловоза:

- плавный пуск и режим тяги тепловоза;
- бесконтактный реверс;
- останов;
- пуск с выбега;

- электрическое реостатное торможение;
- защита от боксования и юза колесных пар.

Питание каждого тягового преобразователя выполняется от своей обмотки трехфазным напряжением тягового синхронного генератора. Максимальное линейное напряжение питания составляет 1450 В. На входе неуправляемого выпрямителя (В) установлен разъединитель, который позволяет в случае аварии в ТП отключить его целиком. При аварии в тяговых электродвигателях или датчиках частоты вращения они могут отключаться индивидуально за счет снятия импульсов управления силовыми транзисторами ТП.

Выпрямитель нагружен на три независимо управляемых АИН, работающих в режиме ШИМ-модуляции с частотой 1 кГц (метод

модуляции — пространственно-векторный ШИМ). Такая структура преобразователя частоты позволяет обеспечить наилучшие динамические и статические показатели тягового электропривода, максимально улучшить его тягово-энергетические показатели за счет индивидуального регулирования тяги каждой колесной пары.

Пример расчета и выбора силовых полупроводниковых приборов тягового преобразователя частоты тепловоза дан в приложении ПЗ.

Общий вид преобразователя показан на рис. 3.54.

Основные технические характеристики преобразователя М-ТЗТП-Т-1-У2 приведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Технические характеристики преобразователя М-ТЗТП-Т-1-У2

Параметр	Значение
Схема соединения фаз двигателя	«звезда»
Число фаз преобразователя, вход/ выход	1×3 / 3×3
Номинальное действующее значение входного линейного напряжения, В	1450
Диапазон изменения действующего значения входного линейного напряжения, В	360—1460



Рис. 3.54. Общий вид тягового преобразователя М-ТЗТП-Т-1-У2 тепловоза 2ТЭ25А-001

Параметр	Значение
Диапазон изменения частоты входного напряжения, Гц	30—100
Номинальное действующее значение выходного тока, А	314
Номинальное действующее значение первой гармоники выходного линейного напряжения, В	800
Номинальная выходная мощность, кВт	3×370
Диапазон регулирования частоты выходного напряжения, Гц	0,3—120
КПД в номинальном режиме, о.е., не менее	0,98
Величина допустимой перегрузки, А	415
Время допустимой перегрузки, мин	2
Режим работы	продолжительный
Диапазон регулирования выходного напряжения при номинальном действующем значении входного напряжения, В	10—1410
Номинальная выходная мощность в режиме реостатного торможения, кВт	1250
Масса, кг, не более	1300
Габаритные размеры, мм, не более:	
высота	1923
глубина	580
ширина	1965
Частота модуляции, Гц	1000

3.5. Проектирование тяговых преобразователей

3.5.1. Системы охлаждения

Помимо элементной базы, важным показателем, определяющим конструкцию тягового преобразователя, его надежность, ремонтпригодность и удобство обслуживания, является его система охлаждения. Традиционно в России тяговые статические преобразователи локомотивов с тяговыми двигателями постоянного (пульсирующего) тока выполнялись с воздушной принудительной системой охлаждения. За рубежом такой однозначности нет. Так, например тяговые преобразователи (ТП) тепловозов Eurogunner типа ER20, разработанные фирмой Siemens AG, имеют жидкостную систему охлаждения, так же как и преобразователи серии TRAXX фирмы Bombardier Transportation.

С другой стороны, американские тепловозы серии Evolution имеют ТП с принудительной воздушной системой охлаждения.

Опыт показывает, что до мощности 550 кВт с одиночными транзисторами предпочтительнее использовать воздушную принудительную систему охлаждения.

При проектировании, например ТП для тепловоза 2ТЭ25А рассматривались различные варианты исполнения тягового преобразователя на IGBT, а именно:

- преобразователь с воздушным охлаждением;
- преобразователь с воздушно-жидкостным охлаждением;
- преобразователь с воздушно-испарительной системой охлаждения на тепловых трубах.

Недостатком варианта с воздушно-жидкостной системой охлаждения является малая эксплуатационная надежность конструкции охладителя. При сильных вибрациях на подвижном составе возможна разгерметизация охладителей или соединительных патрубков, что может привести к серьезным аварийным ситуациям и к возникновению проблем, связанных с электробезопасностью обслуживающего персонала.

На электровозах с жидкостной системой охлаждения приходится мириться, поскольку при единичной мощности АИН более 1 МВт действительно трудно отвести тепло от силовых элементов без применения жидкости. Производители отечественных локомотивов по-возможности стараются избегать применения ТП с жидкостным охлаждением. Во всяком случае, в настоящее время опыт работы с жидкостной системой охлаждения преобразователей в депо практически отсутствует (исключение составляют электровозы ЭП10).

Поскольку коммутационные свойства силовых модулей постоянно улучшаются и в перспективе потери в них будут снижаться, то жидкостная система станет в будущем излишней обузой. Если учитывать тенденцию развития силовых модулей (в том числе в таблеточном исполнении, где отвод тепла от кристалла в 2 раза эффективнее), то применение воздушной системы охлаждения, на наш взгляд, более перспективно.

Вариант с тепловыми трубами (испарительная система охлаждения) также имеет свою перспективу. К сожалению, на рынке

сегодня практически нет предложений по конструкции тепловых труб, которые бы обеспечивали весь комплекс требований к ним (вибростойкость, работоспособность при низких температурах).

Конструкция фазного модуля с принудительной воздушной системой охлаждения для тягового преобразователя тепловоза 2ТЭ25А-001 приведена на рис. 3.55.

Конструкция обеспечивает низкую индуктивность ошиновки. Каждый АИН состоит из трех подобных модулей и тормозного модуля с охладителем облегченной конструкции. Все фазные модули находятся в едином воздушном канале. Для обеспечения равномерного охлаждения всех модулей воздушный канал организован таким образом, что часть холодного воздуха поступает сразу к нижележащим модулям, минуя верхние. Вентилятор системы охлаждения на тепловозе 2ТЭ25А № 001 внешний, но начиная с № 002, вентиляторы встроены внутрь тягового преобразователя. Воздух поступает сверху вниз. Преобразователи на тепловозах с № 002 имеют улучшенные охладители специального профиля. Общий расход воздуха на каждый шкаф, в состав которого входят три АИН и общий выпрямитель, составляет $1,6 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для точного определения потерь в силовых полупроводниковых элементах необходимо знать мгновенные значения токов в силовых приборах и напряжения на них. Поэтому достаточно точный расчет можно выполнить только в процессе математического моделирования работы АИН с конкретно выбранным способом ШИМ-модуляции.

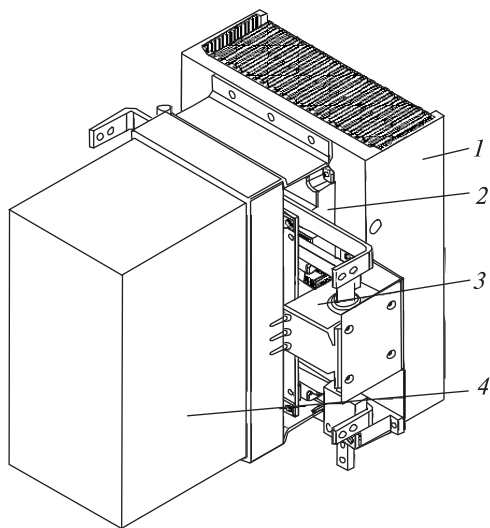


Рис. 3.55. Конструкция фазного модуля с воздушным охлаждением ТП тепловоза 2ТЭ25А: 1 — охладитель; 2 — транзистор; 3 — датчик фазного тока; 4 — силовой конденсатор

3.5.2. Электромагнитная совместимость

В последнее время требования к электромагнитной совместимости локомотивов с железнодорожной и общегражданской инфраструктурой значительно возросли в связи с широким использованием на локомотивах статических преобразователей значительной мощности.

Так, на тепловозе 2ТЭ25А-001 в процессе эксплуатации выявились как минимум две серьезные проблемы, препятствующие его нормальной эксплуатации, — повышенный уровень электромагнитного излучения в окружающую среду (внешняя совместимость) и мешающее влияние тяговых и вспомогательных статических преобразователей на поездную радиостанцию и другое оборудование тепловоза (внутренняя совместимость). Аналогичные проблемы возникли при эксплуатации электровозов ЭП10.

Применение мощных тяговых и вспомогательных статических преобразователей в совокупности с микропроцессорными устройствами управления и регулирования локомотива; информационных шин, связывающих все системы; устройств связи предъявляет особо жесткие требования к устойчивости этих компонентов по воздействию друг на друга и на посторонние электромагнитные поля.

Мешающий потенциал тяговых и вспомогательных преобразователей значительно возрос в связи с использованием современной преобразовательной техники (IGBT-транзисторов), характеризующейся высокими напряжениями, коммутацией значительных мощностей с высокой тактовой частотой, малым временем и токовыми импульсами большой крутизны. Крутизна фронта импульсов напряжения в тяговых преобразователях, работающих на запираемых тиристорах, составляет 0,5—1 кВ/мкс, а на IGBT-транзисторах — от 3 до 10 кВ/мкс. Крутизна импульсов тока составляет соответственно 3—300 и 30—600 А/мкс. В промежуточном звене таких преобразователей напряжение постоянного тока может поддерживаться на уровне от 600 В до 2,8 кВ. Дополнительные сложности вызваны высокой плотностью компоновки оборудования на локомотивах, где силовые устройства и системы управления располагаются рядом. Все эти факторы обусловили принятие на железных дорогах особо жестких норм, правил и технических требований к оборудованию.

Помимо внутриотраслевых требований к электромагнитной совместимости, обусловленных условиями эксплуатации подвижного состава и его компонентов, в России на сегодняшний день в данной области действуют ГОСТ 29205—91, ГОСТ Р 51320—99 и инструкция ЦШ-4783 от 22.12.1989 г.

Спектральные составляющие тягового тока электровоза с включенными на номинальную мощность тяговыми преобразователями (ТП) и преобразователями собственных нужд (ПСН) в полосах рабочих частот локомотивной сигнализации и устройств рельсовых цепей СЦБ должны соответствовать нормам безопасности НБ ЖТ ЦТ 04—98.

Для контроля уровня помех применяются устройства, определяющие значения контрольных параметров электромагнитной совместимости в процессе эксплуатации, например локомотивный индикатор электромагнитной совместимости с фазочувствительными рельсовыми цепями СЦБ (так называемый прибор ЛИЭМС). Такие приборы на отечественных локомотивах ранее не применялись.

Концепция электромагнитной совместимости на подвижном составе, разработанная для выполнения всех существующих требований, предусматривает специальные мероприятия по снижению уровня мешающих влияний проводов и токоведущих частей оборудования, а также повышению устойчивости к посторонним воздействиям компонентов подвижного состава. К ним относятся заземление устройств, экранирование, установка фильтров, прокладка силовых проводов и линий для систем управления и регулирования в виде кабелей различных категорий исполнения. Предусмотрено также проведение специальных измерений для проверки соответствия параметров требованиям соответствующих норм и инструкций.

Электромагнитную совместимость можно определить как способность электротехнических или электронных устройств надежно функционировать в окружающей среде, в то же время не оказывая на нее мешающего воздействия. Это относится к установке в целом по отношению к среде (внешняя совместимость), к отдельным устройствам или компонентам по отношению друг к другу (внутренняя совместимость) и к взаимному влиянию деталей, образующих узел или блок (внутрисхемная совместимость). Для обеспече-

ния электромагнитной совместимости необходимо знать возможные источники мешающих влияний, виды и параметры мешающих факторов и пути их передачи к воспринимающему объекту. Если такая информация имеется, можно принять соответствующие защитные меры. Они могут быть реализованы как на источнике помехи, так и на воспринимающем объекте (приемнике). Возможно также блокирование пути передачи.

Существует четыре пути передачи, соединяющие источник помех с приемником. Это емкостная, индуктивная и гальваническая связь, а также передача излучением.

Емкостная связь представляет собой путь, создаваемый электрическим полем. Она действует на небольшом расстоянии (до нескольких сантиметров) и опасна лишь при параллельной прокладке проводов или кабелей. В этом случае емкость между кабелями, а следовательно и возможными источниками и приемниками помех, особенно велика.

Индуктивная связь реализуется с помощью магнитных полей. Ток, протекающий в проводе, создает магнитное поле, которое, в свою очередь, наводит ток и напряжение в соседних проводах.

Гальваническая связь осуществляется через любые гальванические, т.е. токопроводящие, соединения между источником помех и приемником. Здесь следует также учитывать защитные, заземляющие и выравнивающие потенциал соединители.

Электромагнитная связь известна тем, что на ее принципе работает радио. Для ее реализации используются электромагнитные поля. Электрические и электронные компоненты подвижного состава (в особенности статические преобразователи) могут генерировать электромагнитные поля, которые создают помехи для радиоприемников, мобильных телефонов, переносных радиостанций поездной или производственной связи, носимых радиостанций персонала служб безопасности. Частоты этих помех лежат в диапазоне от 100 кГц до 2 ГГц, но могут распространяться и в более высокие диапазоны.

Тяговые и тормозные токи с ШИМ-регулированием, а также емкостные токи, ответвляющиеся от цепей преобразователей в системы заземления, ведут к образованию магнитных полей в рельсах, кузовной и подкузовной зоне подвижного состава. Эти поля могут в значительной мере осложнять нормальное функционирование устройств СЦБ и связи, работающих на индуктивном

принципе, например счетчиков осей, точечных и шлейфовых систем АЛС, путевых приемоответчиков и др.

Для того чтобы обеспечивался надежный прием в системах локомотивной радиосвязи, уровень помех на антеннах локомотивов не должен превышать 0,3 мкВ. Максимальное расстояние между антеннами и компонентами силовой схемы с коммутирующими устройствами на тяговом подвижном составе не должно превышать 3—5 м, в некоторых случаях оно может быть менее 1 м. Этим объясняются экстремально жесткие требования к помехоизлучению преобразователей в некоторых частотных диапазонах. Нередко эти требования значительно выше, чем в промышленных нормах или в европейском железнодорожном стандарте EN 50121-3-1.

Концепция электромагнитной совместимости на локомотивах определяет общие правила технической и дизайнерской разработки, а также мероприятия, выполнение которых обязательно при разработке отдельных компонентов и единицы подвижного состава в целом. Концепция предусматривает выполнение следующих требований:

- отсутствие помех при нормальном функционировании всех компонентов оборудования;
- исключение возможности возникновения помех при взаимодействии подвижного состава с расположенными вблизи железнодорожными и другими устройствами;
- обязательное выполнение специальных требований эксплуатирующих подвижной состав компаний в отношении электромагнитной совместимости;
- выполнение требований законодательства в отношении помехоизлучения подвижного состава и его восприимчивости к помехам;
- безусловное обеспечение безопасности людей.

Основная концепция обеспечения электромагнитной совместимости включает:

- применение устройств заземления и соединения с корпусом;
- использование элементов экранирования;
- применение электрических фильтров;
- системы передачи данных;
- приборные шкафы и отдельные приборы;
- кабельные разводки.

Современная концепция обеспечения электромагнитной совместимости позволяет с помощью экранирования надежно защищать системы и устройства от низкочастотных магнитных полей, а также от высокочастотных — электрических и электромагнитных.

Все токопроводящие компоненты механической части локомотива должны быть связаны между собой токопроводящими соединениями. Они образуют так называемый корпус, имеющий исходный (условный нулевой) потенциал, по отношению к которому ведутся измерения. К нему подсоединяются корпуса всех приборов и компонентов. Необходимо стремиться к тому, чтобы соединения были низкоимпедансными, т.е. имели минимальные значения индуктивности и активного сопротивления. Пример такого соединения приведен на рис. 3.56.

Электронные компоненты систем управления преобразователей получают питание через преобразователи постоянно постоянного тока, реализующими разделение потенциалов. Корпуса отдельных электронных блоков соединяются с корпусом преобразователя, исполняющим роль экрана, низкоимпедансными проводниками. Все экранирующие элементы следует соединять низкоимпедансными проводниками между собой и с корпусом преобразователя. Любые проводные соединения между приборами системы управления выполняются с разделением потенциалов. Целями этой меры является минимизация разницы потенциалов между электронными схемами и элементами экранирования, создание замкнутой экранирующей оболочки. Это необходимо для повышения защищенности от посторонних мешающих влияний и снижения помехоизлучения в окружающую среду.

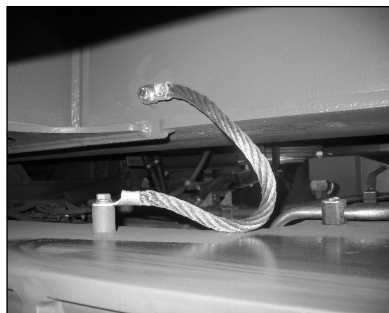


Рис. 3.56. Пример выполнения низкоимпедансного соединения механических частей локомотива

Концепция обеспечения электромагнитной совместимости предусматривает оснащение всех приборов системы управления преобразователями высокочастотными сетевыми фильтрами со стороны питания. Эти фильтры обеспечивают подавление помех в полосе частот от 20 кГц до 100 МГц.

Корпус фильтра также соединяют с корпусом прибора с соблюдением указанных требований. К катушкам всех реле, контакторов, магнитных пускателей и других подобных элементов электросхем подключают варисторы или обратные диоды, которые ограничивают пики напряжения, возникающие при размыкании их цепей механическими контактами.

Все информационные шины, предназначенные для передачи больших объемов информации с высокой скоростью, выполняют беспотенциальными (т.е. гальванически развязанными от корпуса локомотива) и симметричными по величине импеданса относительно корпуса. Благодаря этому значительно снижается чувствительность к синфазным помехам.

Важным пунктом современной концепции обеспечения электромагнитной совместимости является переход на цифровые методы обработки и передачи данных. При этом скорость обработки аналоговых сигналов не должна быть выше, чем требуется по условиям работы прибора. Это значит, что частота аналоговых сигналов ограничена полосой, ширина которой определена указанными условиями. Такие мероприятия могут значительно снизить число ложных срабатываний элементов контроля и ошибочных сообщений диагностической системы об отказах. Задавая определенное время возврата и обеспечивая повторную инициализацию в случае отказа, можно значительно сократить время простоя многих устройств и приборов.

Как показывает практика эксплуатации тепловоза 2ТЭ25А, основным источником излучающих помех являются не столько сами преобразователи, сколько силовые провода и кабели, проложенные от них.

Требования к прокладке силовых проводников. При планировании мероприятий по обеспечению электромагнитной совместимости особое внимание уделяется прокладке проводов. Наиболее важной является проблема емкостной и индуктивной связи. По причине дефицита свободного пространства на локомотиве трудно выдерживать предписываемые нормами безопасные минимальные расстояния между проводами. В связи с этим все провода объединяют в кабели трех категорий: А, В и С.

К категории А относятся две подгруппы — А1 и А2. В подгруппу А1 входят сетевые проводники; сборная шина электроснабжения. Подгруппа А2 объединяет подводы к тяговым двигателям; провода

тормозных резисторов, к которым предъявляются особые требования, так как они могут излучать помехи значительного уровня; линии подключения сетевых фильтров со стороны преобразователей; кабели питания вспомогательных устройств напряжением 400 и 230 В.

Кабели категории В: подводы и выводы аккумуляторной батареи; контрольные кабели, цепи управления.

Кабели категории С: информационные шины; провода датчиков; кабели антенн; разводка сети громкоговорителей.

Для обеспечения развязки кабели разных категорий укладывают с соблюдением следующих минимальных расстояний:

Категории кабелей — минимальное расстояние, м				
	A1	A2	B	C
A1	—	0,1	0,1	0,2
A2	0,1	—	0,1	0,2
B	0,1	0,1	—	0,1
C	0,2	0,2	0,1	—

Правильная раскладка кабелей не только позволяет обеспечить электромагнитную совместимость, но и дает возможность в дальнейшем снизить эксплуатационные расходы на техническое обслуживание.

Кабельные разводки на локомотиве и его отдельных крупных агрегатах выполняются с учетом следующих требований:

- раздельная укладка кабелей разных категорий с соблюдением допустимых минимальных расстояний между группами;

- совместная укладка подводящих и отводящих силовых проводов;

- укладка проводов и кабелей ближе к элементам металлического корпуса, в том числе в кабельных каналах и стальных трубах, которые следует соединять с корпусом локомотива. При этом значительно ослабляются такие факторы, как мешающее излучение проводов и синфазные помехи;

- применение для прокладки кабелей связанных с корпусом стальных труб, каналов и кожухов из листового металла, выполняющих роль дополнительных экранов, если не могут быть выдержаны минимальные расстояния между кабелями разных категорий, особенно по отношению к кабелям категории С.

При пересечении кабелей разных категорий без соблюдения минимальных расстояний, в качестве исключения допускается совместная укладка по длине не более 1 м кабелей категорий А и В, или В и С, но не А и С. При этом следует применять экранирующие оплетки, рукава и стальные трубы, которые как минимум с одного конца должны быть соединены с корпусом локомотива.

Другим важным средством обеспечения электромагнитной совместимости является *экранирование проводов и самих преобразователей*. При оценке эффективности экранирования следует различать средства защиты от электрических и магнитных полей. Электрическое поле создает на идеально проводящей экранирующей оболочке эквипотенциальную поверхность, благодаря чему внутри оболочки электрическое поле отсутствует. Однако в связи с тем, что экран имеет конечное сопротивление, которое к тому же зависит от частоты электрического поля, идеального экранирования достичь трудно. С увеличением частоты эффективность экранирования падает.

Магнитное переменное поле индуцирует в замкнутой электропроводящей оболочке вихревые токи, благодаря чему магнитное поле под оболочкой не возникает. Экранирующий эффект по отношению к магнитному полю растет с увеличением частоты, так как при этом индуцируемые вихревые токи возрастают.

Для обеспечения оптимального экранирования от магнитных и электрических полей экран должен обеспечивать беспрепятственное протекание токов. Отсюда следует, что не замкнутая полностью экранирующая оболочка, например соединенная с корпусом с одного конца, защищает только от статических и низкочастотных электрических полей, а для защиты от электрических, магнитных и электромагнитных полей экранирующая оболочка должна быть замкнута со всех сторон и соединена с корпусом с обоих концов. Исключение составляют провода от датчиков частоты вращения в электровозах, которые закреплены на оси колесных пар, проводящих обратный тяговый ток. Их экранирующую оплетку следует соединять с корпусом только с одного конца.

При экранировании проводников следует соблюдать следующие условия:

- экранирующая оболочка кабелей и оплетка проводов должны быть надежно соединены с корпусом преобразователя, также

являющимся экраном. Соединение должно быть низкоомным и прежде всего низкоиндуктивным;

- использование нулевой жилы кабеля вместо корпуса для подсоединения экранирующей оболочки не допускается;

- экранирующую оболочку кабеля следует соединять с корпусом прибора на его входе, чтобы мешающие токи с оболочки не попали в схему.

Экранирование крупных компонентов электрооборудования. Для обеспечения оптимального экранирования корпуса тяговых и вспомогательных преобразователей изготавливают металлическими с дополнительным экранирующим уплотнением крышек и люков. Они заземляются на корпус локомотива не менее чем в четырех (тяговый преобразователь) или двух (вспомогательный) местах. В последнем случае места заземления располагают по диагонали корпуса.

Тормозной резистор должен быть закрыт кожухом из перфорированного металлического листа. Отверстия должны иметь размер 20×20 мм и располагаться с шагом не менее 2 мм. Кожух заземляется не менее чем в двух местах.

Требования к заземлителям. Для заземления (соединения с корпусом подвижного состава) таких крупных компонентов электрооборудования, как тяговые и вспомогательные преобразователи, используется пруток круглого сечения, площадь которого выбирается в соответствии со специальной таблицей. Длина заземлителя должна быть не более 300—350 мм, в исключительных случаях — до 500 мм. Если по местным условиям требуется заземлитель большей длины, используют медную ленту, например, сечением 40×6,5 мм с напрессованным наконечником. Длина ленты, как и прутка, должна быть минимальной.

Требования к подвижному составу. В соответствии с ГОСТ 29205—91 устанавливается предельно допустимый уровень помех, оказываемых радиоприему единицей подвижного состава в целом. Измерения этого уровня проводят с помощью специальных антенн в диапазоне частот 9 кГц—1 ГГц на расстоянии 10 м от рельсов.

Наряду с этим проводят измерение помех, которые локомотив оказывает работе технологической и поездной радиосвязи. Для измерения уровня излучаемых помех исследуемый локомотив устанавливают на участке пути, расположенном в зоне, удаленной от промышленных предприятий и возможных источников дополни-

тельных помех. При работе локомотива в режиме тяги определяют уровень помех, наводимых на антенну радиостанции. При этом руководствуются указаниями инструкции ЦШ-4783.

Проблема «длинного кабеля» при использовании тягового преобразователя частоты. Преимущества IGBT-транзисторов в АИН при использовании ШИМ-модуляции сочетаются с рядом проблем, одной из которых является проблема «длинного кабеля», соединяющего обмотки АТД с выходом АИН. Прохождение подобного сигнала вызывает волновые процессы в кабеле, приводящие к перенапряжению на зажимах АТД. На осциллограммах рис. 3.57 показаны соответствующие напряжения на зажимах тягового двигателя и преобразователя при длине питающего кабеля около 20 м.

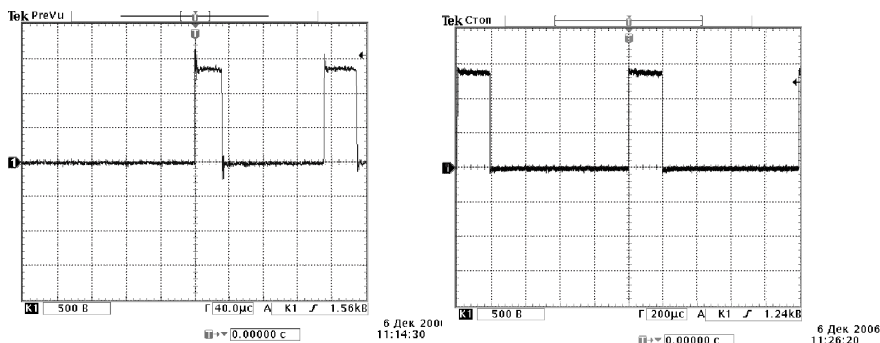


Рис. 3.57. Напряжения на зажимах двигателя и преобразователя

В этом случае кабель следует рассматривать как длинную линию с распределенными параметрами, элементарный участок которой показан на рис. 3.58.

Если пренебречь значениями r_k и g_k , то волновое сопротивление при этом определяется соотношением

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_k}{C_k}}.$$

Значение параметров L_k и C_k зависят от типа, конструкции и сечения кабелей, но, как показывают измерения, эта зависимость незначительна. Для широкого ассортимента монтажных проводов $L_k = 1$ мкГн/м, $C_k = 50$ пф/м. В этом случае $Z_0 = 140$ Ом. Входное

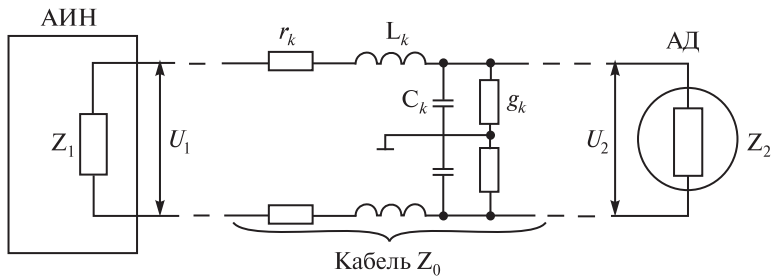


Рис. 3.58. Элементарный участок кабеля

сопротивление кабеля Z_1 является выходным для преобразователя и обычно при использовании низкоиндуктивных конденсаторов в преобразователе практически равно нулю. Выходное сопротивление кабеля Z_2 является входным для АД. Оно определяется индуктивностью рассеяния АД и эквивалентной частотой фронта импульса напряжения.

$$Z_2 = \omega_f L; \quad \omega_f = \frac{\pi}{t_f};$$

где $t_f = 0,05—1$ мкс — время переключения транзисторов IGBT.

Поэтому $Z_2 \gg Z_0$. Для АД мощностью около 400 кВт имеем $Z_2 \approx 800$ Ом.

Таким образом, при прохождении крутого импульса напряжения входная часть кабеля (со стороны АИН) работает в режиме короткого замыкания, а выходная — в режиме холостого хода. В такой линии скорость распространения волны (в нашем случае — фронта импульса) определяется выражением

$$V_f = \frac{1}{\sqrt{L_k \cdot C_k}}.$$

Для приведенных выше значений это составляет $V_f = 142 \times 10^6$ м/с. Соответственно длина волны для разных типов IGBT-транзисторов составит (для транзисторов с более высоким быстродействием длина волны меньше):

$$\lambda = \frac{2\pi \cdot V_f}{\omega_f} \approx 14—280 \text{ м}.$$

Время прохождения волны по всей длине кабеля

$$T_f = \frac{l}{V_f},$$

где l — длина кабеля.

Если это время больше или равно времени фронта импульса, то в конце кабеля из-за несогласованности его с нагрузкой ($Z_2 \gg Z_0$) возникает отраженная волна напряжения, которая, суммируясь с падающей волной, в результате образует стоячие волны с амплитудой

$$U_2 = U_1(1 + n_2),$$

где n_2 — коэффициент отражения, максимальное значение которого близко к единице:

$$n_{2\text{макс}} = \frac{Z_2 - Z_0}{Z_2 + Z_0} \approx 1.$$

Возвращаясь к АИН, данная волна гасится за счет малого входного сопротивления кабеля. Поэтому на выходе АИН напряжение всегда в норме.

При T_f меньше, чем длина фронта, n_2 рассчитывается по формуле

$$n_2 = n_{2\text{макс}} \frac{T_f}{t_f}.$$

Таким образом, от длины волны зависит критическая длина кабеля. Если его длина равна половине длины волны — она считается критической. В этом случае на входе АТД могут присутствовать импульсы напряжения удвоенной амплитуды.

В зависимости от мощности электропривода и с учетом характеристик современных IGBT-транзисторов критическая длина кабеля может составлять от 7 до 140 м.

Данное явление следует учитывать при проектировании АТД. Для надежной работы необходимо выполнять усиленную изоляцию обмотки АТД и, возможно, устанавливать на выходе ТП фильтры, ограничивающие скорость изменения напряжения или устанавливать возле АТД согласующие фильтры. В тяговых электроприводах, где используются транзисторы с временем включения

около 0,5 мкс, критическая длина кабеля составляет порядка 30 м, поэтому специальных фильтров можно не устанавливать. Однако в каждом конкретном случае рекомендуется выполнять необходимые расчеты и измерения.

3.6. Системы защиты тяговых преобразователей

Разработка системы защиты является важнейшей частью технического проекта на тяговые преобразователи. Это связано с тем, что, как правило, аварии в тяговом преобразователе приводят к большому материальному ущербу. Силовые приборы, драйверы, датчики, низкоиндуктивная ошиновка в настоящее время являются достаточно дорогостоящими изделиями.

Обычно перечень защит тяговых преобразователей выглядит следующим образом:

- от превышения максимального фазного тока АТД;
- от внешних и внутренних коротких замыканий;
- от превышения максимально допустимого напряжения на фильтровых конденсаторах;
- от недопустимого снижения напряжения на фильтровых конденсаторах;
- от превышения максимально допустимого входного напряжения контактной сети (для электровозов);
- от недопустимого снижения входного напряжения питания;
- от перегрева полупроводниковых приборов;
- то же, тяговых двигателей;
- то же, тормозных резисторов;
- от недопустимой перегрузки по току IGBT-модулей;
- от превышения температуры охлаждающей жидкости;
- от падения давления жидкости или воздуха в системе охлаждения преобразователя;
- от коротких замыканий силовых цепей на корпус;
- от исчезновения или недопустимого снижения напряжения вспомогательных цепей преобразователя (согласно ГОСТ 24607—88);
- от снижения сопротивления изоляции;
- автоматическое снятие напряжения при несанкционированном доступе и др.

Дополнительно необходимо предусматривать и другие виды защит, которые обеспечивают безопасную эксплуатацию преобразователя, например защиты от неверных действий оператора; от неисправностей датчиков тока, напряжения, частоты вращения тяговых электродвигателей; недопустимого снижения напряжений питания в СУ ТП, а также питания выходных каскадов драйверов управления силовыми приборами; от потери работоспособности оптоволоконных приемопередатчиков; от юза и боксования; от противовключения (когда локомотив скатывается с горки) и др.

В процессе проектирования ТП должна быть обеспечена селективность (последовательность срабатывания) всех защитных операций. Рекомендуется построить таблицу, в которой перечисляются все виды защитных операций, указываются источники сигналов (датчики), определяются уставки срабатывания и далее по всей цепочке указываются все исполнительные органы, с помощью которых локализуется аварийная ситуация; далее указывается режим работы, в который переводится локомотив после срабатывания защиты, а также последовательность последующих действий (например, повторный запуск преобразователя), в том числе действия машиниста (если они необходимы); оценить время реакции исполнительных органов на аварийный сигнал и соразмерить его с максимально допустимым временем для каждой аварийной ситуации. Без необходимости не следует выполнять защиту быстродействующей, поскольку в этом случае возможны ее ложные срабатывания, что осложняет эксплуатацию локомотива.

Защитные операции могут выполняться как на программном, так и на аппаратном уровнях. Программные защиты, как правило, менее быстродействующие, но при этом имеют больший уровень помехозащищенности. Защиты от коротких замыканий и перенапряжений, т.е. те виды защит, где требуется быстрая реакция на аварийный сигнал, рекомендуется выполнять и на аппаратном, и на программном уровнях.

Глава 4. УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ ЛОКОМОТИВОВ

В главе 4 сформулированы общие требования к системам управления тягового электропривода, описаны способы управления АТП, дана оценка их влияния на динамические свойства локомотива. Дан подробный анализ системы векторного управления АТП. Рассмотрено формирование заданий потокоосцепления и момента АТД.

Приведены примеры синтеза системы автоматического регулирования асинхронного тягового привода электровоза.

Представлено описание системы управления асинхронным тяговым приводом тепловоза 2ТЭ25А «Витязь».

Рекомендуемая литература: [1, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 23, 25].

4.1. Общие положения. Структура системы управления

Опыт создания локомотивов показал, что в случае применения АТП ручное регулирование сил тяги и электрического торможения невозможно. Поэтому статические и динамические характеристики локомотива формируются системой автоматического управления, которая определяет его тягово-энергетические показатели и функциональность.

Динамические показатели тягового привода и эффективность использования АТД во многом определяются схемотехникой преобразовательных установок и принципами регулирования, реализуемыми системой управления. Одним из ключевых вопросов при разработке локомотивов нового поколения является создание системы управления асинхронным тяговым приводом, обеспечивающей реализацию высоких тяговых свойств во всем диапазоне нагрузок и скоростей.

К числу актуальных задач относятся: определение принципов функционирования и структуры системы автоматического регулирования АТД; формирование задающих воздействий потокоосцепления и момента и т.п.

Поскольку процессы во всех элементах локомотива определяются принципами построения, структурой и параметрами системы

управления, ее разработка должна проводиться совместно с проектированием остальных элементов тягового электропривода — тяговыми двигателями, устройствами преобразования электроэнергии, механической частью. Для этого необходимо использовать подход, при котором локомотив с АТП рассматривается как управляемая электромеханическая система.

К числу основных задач, возникающих при разработке системы управления асинхронным тяговым приводом, относятся определение принципов и способов регулирования тяговых двигателей, разработка структуры микропроцессорных систем управления и алгоритмов их функционирования.

Как следует из гл. 3, наибольшее распространение получила двухзвенная структура тягового преобразователя. При этом на электровозах переменного тока в качестве входного используется 4q-S-преобразователь, позволяющий получить на выходе стабилизированное напряжение заданной величины. На электровозах постоянного тока в качестве входного используется импульсный преобразователь. На тепловозах аналогичные функции выполняют дизель-генераторная установка и выпрямитель.

В качестве выходного преобразователя используется АИН, на который, кроме преобразования частоты и числа фаз, возлагается также функция регулирования величины выходного напряжения.

На большинстве современных локомотивов система управления имеет иерархическую структуру, включающую три уровня. На рис. 4.1 приведен один из возможных вариантов структурной схемы системы управления тяговым электроприводом электровоза переменного тока с АТД.

На *верхнем уровне* находится система управления движением электровоза. Входной информацией для нее являются поступающие с контроллера машиниста (КМ) команды и получаемые от системы контроля и диагностики данные о состоянии оборудования. Также может использоваться информация, поступающая от СЦБ и диспетчерской службы. Эта система осуществляет определение режима работы оборудования. В ее функции входит формирование задания на управление 4q-S-преобразователями, потокосцепления и электромагнитного момента на валу АТД в зависимости от задаваемого режима работы, текущих параметров движения и имеющейся информации о состоянии локомотива. Система управле-

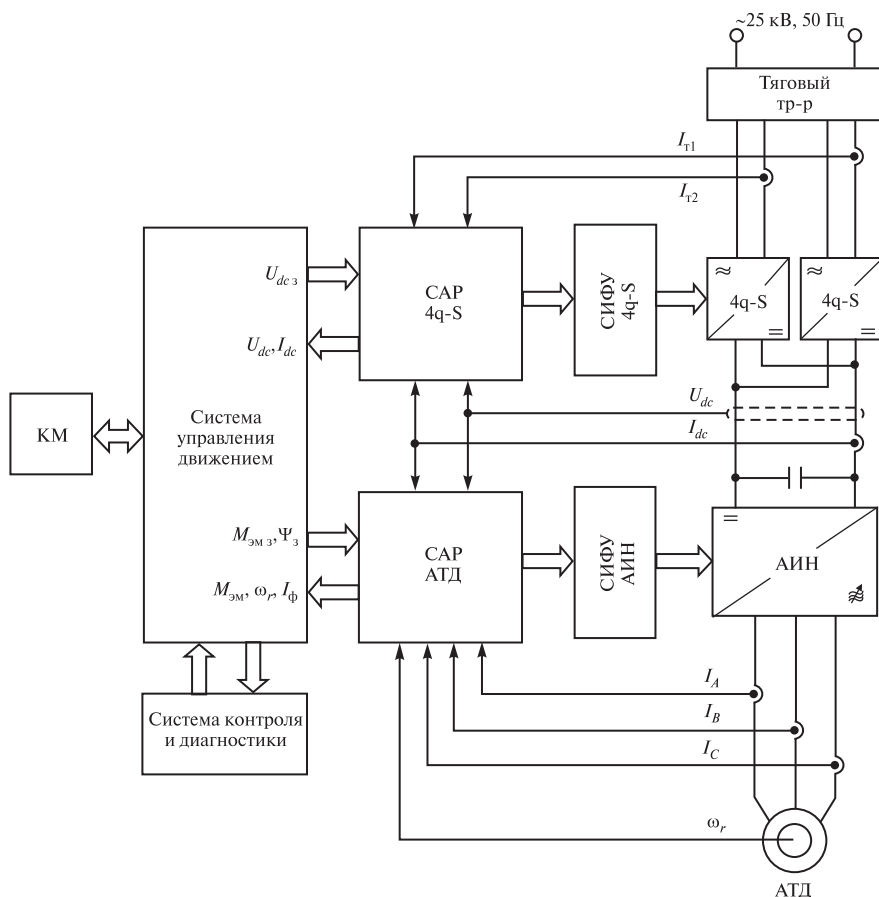


Рис. 4.1. Структурная схема системы управления электровоза переменного тока с АД

ния движением должна иметь подсистемы защиты от боксования, предотвращения аварийных ситуаций и защиты от их последствий, а также индикации текущего состояния систем и оборудования электровоза. Эта система является общей для всего локомотива и обеспечивает совместную работу всех подчиненных ей систем.

На *среднем уровне* иерархии находятся системы автоматического регулирования (САР) отдельных элементов ТЭП, таких как 4-qS-преобразователь и система АИН-АТД. В их задачи входит по

задаваемым параметрам режима работы этих устройств (напряжение в звене постоянного тока, момент и потокосцепление АТД) выдавать системе импульсно-фазового управления (СИФУ) соответствующих преобразователей, находящейся на *нижнем уровне* иерархии, исходные данные для формирования последовательности импульсов управления СПП.

Системы автоматического регулирования и СИФУ (второго и третьего уровней иерархии), как правило, выполняются для тяговых двигателей, питающихся от общего инвертора, и вместе с устройствами преобразования электроэнергии представляют собой систему управления ТЭП одной тележки локомотива.

Система автоматического управления тепловоза включает подсистему регулирования дизель-генераторной установки, которая расположена на втором (среднем) уровне иерархии и выполняет функции, соответствующие системе управления входными преобразователями электровоза.

Системы автоматического регулирования АТД для тепловозов и электровозов не имеют принципиальных отличий по структуре и способам управления, поэтому вопросы регулирования АТД рассматриваются без разделения на области применения для электровозов и тепловозов, за исключением тех случаев, когда имеются существенные особенности их построения.

4.2. Требования к системе регулирования асинхронного тягового привода с точки зрения реализации силы тяги

4.2.1. Требования к динамическим показателям системы регулирования силы тяги

Особенностью тягового электропривода является наличие пары трения «колесо—рельс», где происходит преобразование энергии вращения колесной пары в энергию поступательного движения локомотива.

Коэффициент сцепления колеса и рельса $\psi_{\text{сц}}$ устанавливает связь между силой сцепления $F_{\text{сц}}$, обеспечивающей перемещение экипажа по рельсам при наличии приложенного к колесу вращающего момента тягового двигателя, и силой нажатия колеса на рельс N :

$$F_{\text{сц}} = \psi_{\text{сц}} N.$$

Коэффициент сцепления $\psi_{\text{сц}}$ зависит от скорости проскальзывания колеса относительно рельса $V_{\text{ск}}$, эта зависимость вида $\psi_{\text{сц}} = f(V_{\text{ск}})$ получила название характеристики сцепления.

Часто используется характеристика сцепления, представленная в относительных единицах: $\psi = f(v_{\text{ск}})$, где $\psi = \psi_{\text{сц}} / \psi_{\text{max}}$ — относительная величина коэффициента сцепления, $v_{\text{ск}} = V_{\text{ск}} / V$ — относительная скорость проскальзывания. Как правило, ее выражают в процентах от поступательной скорости локомотива V .

Вид характеристики сцепления $\psi = f(v_{\text{ск}})$ при $V = 50$ км/ч показан на рис. 4.2.

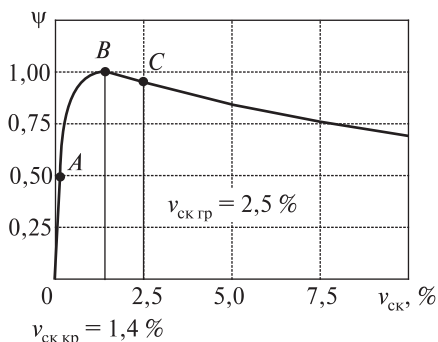


Рис. 4.2. Характеристика сцепления (при $V = 50$ км/ч)

В пределах характеристики сцепления можно отметить три участка: восходящий, в котором в свою очередь выделяют начальный (0A) и собственно восходящий (AB); затем промежуточный (BC), в пределах которого коэффициент сцепления снижается до $\psi_C < \psi_{\text{max}}$, и падающий. Аппроксимация ветвей характеристики сцепления (при измерении $v_{\text{ск}}$ в процентах, а V в м/с), имеет следующий вид:

— начальный участок (при $0 < v_{\text{ск}} \leq 0,14$ %)

$$\psi = 3,571 v_{\text{ск}};$$

— восходящий участок (при $0,14 < v_{\text{ск}} \leq 1,4$ %)

$$\psi = \frac{3,5v_{\text{ск}} - 0,155}{3,36v_{\text{ск}} + 0,196};$$

— промежуточный участок (при $1,4 < v_{\text{ск}} \leq 2,5$ %)

$$\psi = 1,06 - 0,045 v_{\text{ск}}; \quad (4.1)$$

— падающий участок (при $v_{\text{ск}} > 2,5$ %)

$$\psi = \frac{1}{1 + 0,01\chi_c V(v_{\text{ск}} - 2,5)}, \quad (4.2)$$

где $\chi_C = \frac{1}{F_0} \frac{dF_{\text{сц}}}{dV_{\text{ск}}}$, [с/м] — жесткость характеристики сцепления в точке C , зависящая от поступательной скорости движения локомотива — снижается с ростом V :

V , км/ч	около нуля	5—20	20—40
χ_C , с/м	0,9	0,6	0,5

Первые два участка характеристики сцепления (восходящий и промежуточный) соответствуют упругому скольжению в контакте «колесо—рельс», а при $v_{\text{ск}} > v_{\text{ск}C}$ скольжение становится избыточным, причем функциональная зависимость определяется падающим участком характеристики сцепления.

Коэффициент сцепления является определяющим понятием при рассмотрении тяговых свойств локомотивов. На значение коэффициента сцепления оказывают влияние многие регулярные и случайные факторы, проявляющиеся при движении. В условиях эксплуатации коэффициент сцепления является случайной величиной, имеющей разброс ± 50 % от среднего значения. В связи с этим принято говорить о *потенциальном* (максимально возможном в данных условиях) ψ_{max} и *расчетном* ψ_p значениях коэффициента сцепления.

Улучшение тяговых свойств в конечном итоге заключается в приближении величины ψ_p к ψ_{max} . При выполнении ряда благоприятных условий возможно обеспечить значение ψ_p в диапазоне $(0,93—0,95)\psi_{\text{max}}$ при $\psi_{\text{max}} = 0,3$.

Для повышения тяговых свойств, наряду с мероприятиями по совершенствованию механической части тягового привода и улучшению условий сцепления, необходимо совершенствовать электрическую часть, причем одной из наиболее важных целей является повышение жесткости тяговых характеристик.

Если характеристика тягового привода такова, что при небольшом увеличении частоты вращения колесной пары происходит резкое уменьшение силы тяги, то скорость проскальзывания даже в случае значительного превышения силой тяги сил сцепления не может достичь большой величины. Поэтому при восстановлении условий сцепления происходит быстрое восстановление реализуемого коэффициента сцепления и сила тяги уменьшается только

кратковременно. Если же скорость проскальзывания достигает большого значения, то требуется длительное время для восстановления прежнего значения коэффициента сцепления и поэтому происходит значительное снижение силы тяги.

Таким образом, для повышения тяговых свойств локомотива, целесообразно придавать его тяговым характеристикам такую форму, при которой незначительное изменение частоты вращения колесной пары приводило бы к резкому снижению силы тяги, т.е. целесообразно увеличивать жесткость тяговых характеристик.

Последнюю принято оценивать коэффициентом жесткости:

$$X = -\frac{dF}{dV}, \text{ [кН} \cdot \text{с/м]}, \quad (4.3)$$

или коэффициентом относительной жесткости:

$$\chi = -\frac{dF}{F_0 dV}, \text{ [с/м]}. \quad (4.4)$$

Среди требований, предъявляемых к электрическим схемам, предупреждающим развитие боксования, имеется следующее ограничение на жесткость тяговых характеристик: жесткость групповой тяговой характеристики χ должна превышать жесткость характеристики сцепления χ_C в начальной зоне ее падающей ветви.

Как было указано выше, жесткость начальной части падающего участка характеристики сцепления уменьшается с ростом скорости движения и имеет максимальное значение $\chi_C = 0,9 \text{ с/м}$ при $V < 5 \text{ км/ч}$. Следовательно, для выполнения условия $\chi > \chi_C$ во всем диапазоне скоростей движения необходимо соблюдать ограничение $\chi > 0,9 \text{ с/м}$.

Жесткость тяговых характеристик локомотива во многом определяется жесткостью электромеханических характеристик ТЭД. Отмечается, что выполнение сформулированного выше требования к жесткости тяговых характеристик возможно при использовании ТЭД постоянного тока с независимым возбуждением.

На основе анализа опытных данных, полученных при испытаниях электровоза ВЛ80^А с АТД НБ-602, показано, что жесткость его тяговых характеристик даже при линейном ускорении колеса более 10 м/с^2 составляет не менее $1,4 \text{ с/м}$, что примерно в 1,5 раза превосходит жесткость тяговых характеристик локомотивов с ТЭД

независимого возбуждения. Поэтому асинхронный привод обладает лучшими противобоксовочными свойствами, что говорит о целесообразности применения АД для повышения тяговых свойств.

4.2.2. Влияние динамических показателей привода на тяговые свойства локомотива

Кроме коэффициента сцепления, являющегося нестационарной величиной, изменение которой носит случайный характер, на величину реализуемой силы тяги оказывают влияние также динамические свойства тягового привода. Для выяснения степени влияния динамических свойств привода и формулировки требований к ним необходимо рассматривать тяговый привод как единую систему.

Полная картина процессов в ТЭП электровоза или тепловоза может быть получена с использованием комплексной компьютерной модели (см. ниже гл. 6), в которой совместно моделируются система управления, электрическая и механическая части, процессы в системе тягового энергоснабжения (или дизель-генераторной установке), реализация силы тяги в контакте «колесо—рельс». Учитывая значительную сложность такой модели, ее применение целесообразно на завершающих этапах разработки, когда применение более простых моделей не позволяет добиться представления процессов с требуемой точностью.

Поэтому для предварительного анализа динамических свойств АТП с учетом процессов в контакте «колесо—рельс», определения параметров быстродействия САР и принципов функционирования системы защиты от боксования, как правило, используют упрощенную модель, описывающую процессы только для одной колесной пары.

Обобщенная функциональная схема тягового привода приведена на рис. 4.3, где показаны:

- КМ — контроллер машиниста (в общем случае — система управления верхнего уровня иерархии);
- КС — контактная сеть;
- ЭМП — электромеханический преобразователь (электрическая часть ТЭП), включающий систему преобразования электроэнергии (СПЭ), управляемую системой управления (СУ), и АД. Входным сигналом для ЭМП является задание момента M^* , пос-

$$W_{\text{эм}}(s) = \frac{1}{T_{\text{эм}}s + 1}.$$

Величина $T_{\text{эм}}$ определяется многими факторами: типом АД, типом преобразовательной установки, способом управления, реализуемым СУ.

Электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$ через тяговый редуктор с передаточным числом $i_{\text{ред}}$ подается на ось КП. При условии, что тяговая передача является абсолютно жесткой, момент на оси КП равен

$$M_{\text{к}} = i_{\text{ред}} M_{\text{эм}},$$

этот момент создает тяговое усилие $F_{\text{к}}$, равное

$$F_{\text{к}} = M_{\text{к}} / R_{\text{к}} = i_{\text{ред}} M_{\text{эм}} / R_{\text{к}},$$

где $R_{\text{к}} = D_{\text{к}}/2$ — радиус бандажа КП по кругу катания.

Уравнение вращения колесной пары имеет вид:

$$\frac{d\omega_{\text{к}}}{dt} = \frac{1}{J_{\Sigma}} (M_{\text{к}} - M_{\text{с}}), \quad (4.5)$$

где $\omega_{\text{к}}$ — угловая скорость вращения КП;

$M_{\text{с}} = F_{\text{сц}} R_{\text{к}}$ — момент сил полезного сопротивления на ободе колеса.

Суммарный момент инерции, приведенный к оси КП, определяется по формуле:

$$J_{\Sigma} = (J_{\text{кп}} + J_{\text{бш}}) + (J_{\text{мш}} + J_{\text{рот}}) i_{\text{ред}}^2,$$

в которой обозначения аналогичны вышеприведенным.

Сила сцепления определяется, как было указано выше, следующим образом:

$$F_{\text{сц}} = \psi_{\text{max}} \psi(V_{\text{ск}}, V) N. \quad (4.6)$$

В качестве элемента структурной схемы это соответствует динамическому нелинейному безынерционному пропорциональному звену, коэффициент передачи которого меняется в зависимости от положения рабочей точки на характеристики сцепления. При исследовании динамических свойств привода следует произвести линеаризацию характеристики сцепления. Тогда связь между си-

лой сцепления и скоростью скольжения может быть выражена в виде

$$\Delta F_{\text{сц}} = X \Delta V_{\text{ск}}.$$

После линеаризации, структурная схема ТЭП с учетом процессов в месте контакта «колесо—рельс» принимает вид, показанный на рис. 4.4.

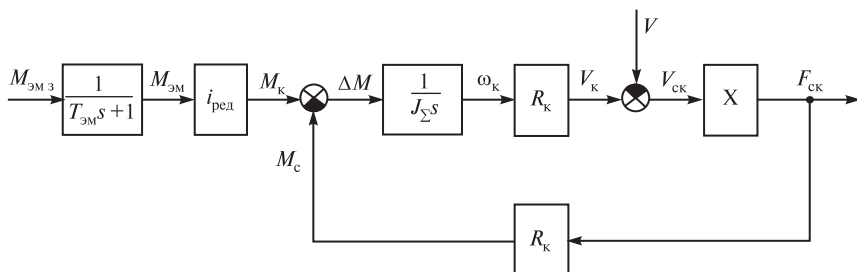


Рис. 4.4. Структурная схема тягового электропривода

Передаточная функция ТЭП относительно частоты вращения КП имеет вид:

$$\begin{aligned} W_{\text{ТЭП}}(s) &= \frac{1}{T_{\text{эм}} s + 1} i_{\text{ред}} \frac{1}{J_{\Sigma} + X R_{\text{к}}^2} = \\ &= \frac{i_{\text{ред}}}{T_{\text{эм}} J_{\Sigma} s^2 + \left(T_{\text{эм}} X R_{\text{к}}^2 + J_{\Sigma} \right) s + X R_{\text{к}}^2}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Как отмечалось выше, характеристика сцепления является нелинейным пропорциональным звеном, при этом коэффициент передачи X имеет знакопеременный характер. Случай $X \geq 0$ соответствует работе на восходящей (продуктивной) ветви характеристики сцепления, тогда как при $X < 0$ ТЭП работает в режиме боксования.

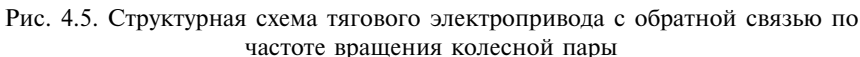
Когда жесткость характеристики сцепления имеет отрицательную величину, обратная связь по моменту сопротивления меняет знак и становится положительной, что приводит к структурной неустойчивости привода — неограниченному росту частоты вращения КП, что соответствует разносному боксованию. Во избежание

Если в качестве регулятора скорости используется пропорциональное звено с коэффициентом передачи k_{pc} , то передаточная функция системы имеет вид:

Так как необходимым и достаточным условием устойчивости систем второго порядка является положительность коэффициентов характеристического уравнения, условия устойчивости рассматриваемой системы могут быть записаны в виде:

Для случая когда $X < 0$, эти условия примут вид:

$$T_{\text{ЭМ}} < \frac{J_{\Sigma}}{R_{\text{К}}^2 X} \quad (4.10)$$



Величина $X_{\text{ТЭП}} = k_{\text{рс}} \frac{i_{\text{ред}}}{R_{\text{к}}^2} [\text{Н} \cdot \text{с/м}]$ имеет смысл жесткости тяговой характеристики ТЭП, а $T_{\text{кр}} = \frac{J_{\Sigma}}{R_{\text{к}}^2 X}$ — критическое значение постоянной времени ЭМП.

Таким образом, для обеспечения устойчивости системы жесткость тяговой характеристики должна превышать жесткость характеристики сцепления, которая зависит от поступательной скорости локомотива и максимальна при скоростях, не превышающих 5 км/ч. Поэтому для обеспечения устойчивости во всем диапазоне скоростей движения локомотива, жесткость тяговой характеристики должна превышать жесткость характеристики сцепления при поступательной скорости, близкой к нулю (т.е. в стоповых и околоstopовых режимах).

Кроме того, необходимо стремиться к тому, чтобы ТЭП имел возможность реализовать максимально возможную по условиям сцепления силу тяги, т.е. рабочая точка должна располагаться в области максимальных значений коэффициента сцепления.

Вид характеристики сцепления, как следует из (4.6), зависит от максимально возможного коэффициента сцепления и от нажатия колеса на рельс. Максимально возможный коэффициент сцепления является случайной величиной, при этом в результате экспери-

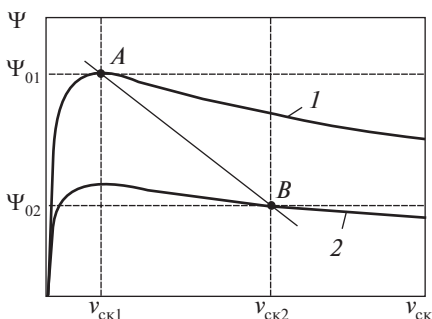


Рис. 4.6. Изменение положения рабочей точки при ухудшении условий сцепления

ментальных исследований установлено, что 90 % его значений лежит в пределах от 0,2 до 0,4. Поэтому при определении жесткости тяговой характеристики необходимо учитывать наихудший из вариантов — переход с характеристики сцепления $\psi_{\text{max}} = 0,4$ на характеристику $\psi_{\text{max}} = 0,2$. Переход с одной характеристики на другую показан на рис. 4.6.

Пусть привод первоначально находился в рабочей точке

$A(v_{\text{ск1}}, \psi_{01})$. В этом случае уравнение тяговой характеристики — прямой, проходящей через точки A и B , — имеет вид:

$$\psi = \psi_{01} - \chi V(v_{\text{ск}} - 0,025). \quad (4.11)$$

Ниспадающий участок характеристики сцепления 2 (см. рис. 4.6) согласно (4.2) описывается выражением:

$$\psi = \frac{\psi_{02}}{1 + \chi_C V(v_{\text{ск}} - 0,025)}, \quad (4.12)$$

где $v_{\text{ск}}$ — скорость проскальзывания в относительных единицах.

Необходимо решать систему уравнений (4.11)—(4.12), задаваясь различными значениями жесткости тяговой характеристики. Для удобства рассмотрения жесткость тяговой характеристики целесообразно принимать кратной жесткости характеристики сцепления в начале ниспадающего участка при поступательной скорости локомотива менее 5 км/ч, т.е. $\chi = k\chi_{C5}$. Учитывая, что $\chi_{C5} = 0,9$, жесткость тяговой характеристики представится как $\chi = 0,9k$.

Для решения системы уравнений (4.11)—(4.12) составим квадратное уравнение:

$$v_{\text{ск}}^2 - Bv_{\text{ск}} + C = 0,$$

где $B = 0,05 - \frac{1}{\chi_C V} + \frac{\psi_{01}}{0,9kV}$;

$$C = 6,25 \cdot 10^{-4} - \frac{1,4}{\chi_C V} + \frac{\psi_{01}}{36kV} - \frac{\psi_{01} - \psi_{02}}{0,9k\chi_C V^2}.$$

Решение квадратного уравнения имеет вид

$$v_{\text{ск}} = \frac{B + \sqrt{B^2 - 4C}}{2},$$

значение реализуемого коэффициента сцепления ψ берем согласно (4.11), коэффициент использования потенциальных условий сцепления

$$\eta = \frac{\psi}{\psi_{02}}.$$

Учитывая изменение жесткости характеристики сцепления при изменении поступательной скорости локомотива, коэффициент

использования потенциальных условий сцепления является функцией двух переменных $\eta = f(V, k)$. При повышении жесткости тяговой характеристики наблюдается рост коэффициента использования потенциальных условий. При этом зависимость $\eta = f(k)$ нелинейна: при увеличении жесткости до $\chi \approx 6\chi_{C5}$ коэффициент η значительно возрастает и при $\chi \approx 5,2\chi_{C5}$ превышает значение 0,9; дальнейшее повышение жесткости тяговой характеристики не приводит к значительному росту η .

Из проведенного анализа следует вывод о том, что для устойчивой работы привода при срыве сцепления необходимо, чтобы жесткость его тяговой характеристики превышала жесткость характеристики сцепления в начале ниспадающего участка (достигающей своего максимального значения при поступательной скорости локомотива, не превышающей 5 км/ч). Кроме того, для обеспечения коэффициента использования потенциальных условий сцепления не менее 0,9 во всем диапазоне изменения скоростей движения локомотива, жесткость тяговой характеристики должна превышать жесткость характеристики сцепления не менее чем в 6 раз. Однако дальнейшее превышение не приводит к значительному увеличению коэффициента η , поэтому целесообразно ограничиться превышением в 6 раз.

Как было отмечено выше, выражение (4.10) диктует определенные требования к динамическим свойствам привода, а именно: для обеспечения устойчивости привода постоянная времени ЭМП не должна превышать некоей величины (названной критическим значением), зависящей от параметров механической части привода. Однако при этом не учитывается качество переходных процессов, также оказывающее влияние на величину реализуемой силы тяги.

Для анализа влияния жесткости и постоянной времени ЭМП на качество переходных процессов выражение (4.8), соответствующее динамическому звену второго порядка, можно представить в виде:

$$W_{TЭП}(s) = \frac{k'}{(T')^2 s^2 + 2\xi T' s + 1},$$

$$\text{где } k' = \frac{i_{\text{ред}} k_{\text{рс}}}{R_k^2 (X_{TЭП} - X)}, \quad T' = \sqrt{\frac{T_{\text{эм}} J_{\Sigma}}{R_k^2}} (X_{TЭП} - X), \quad \xi = \frac{1}{2} \frac{J_{\Sigma} - T_{\text{эм}} R_k^2 X}{\sqrt{T_{\text{эм}} J_{\Sigma} R_k^2 (X_{TЭП} - X)}}.$$

В зависимости от коэффициента ξ переходный процесс будет носить либо колебательный, либо аperiodический характер с разной величиной перерегулирования.

При колебательном переходном процессе угловая скорость вращения КП, а вместе с ней и скорость скольжения может достигать значений, значительно превышающих установившееся. Вследствие этого процесс восстановления сцепления затягивается, причем в некоторых случаях возможно возникновение прерывистого боксования, что ухудшает тяговые свойства ТЭП. Поэтому предпочтительным является аperiodический процесс. По этой причине настройка системы должна производиться на технический оптимум. В этом случае $\xi = 0,7$; а значение $T_{\text{эм}}$ может быть определено из уравнения:

$$\frac{1}{2} \frac{J_{\Sigma} - T_{\text{эм}} R_{\text{к}}^2 X}{\sqrt{T_{\text{эм}} J_{\Sigma} R_{\text{к}}^2 (X_{\text{ТЭП}} - X)}} = 0,7.$$

Решением этого уравнения будет значение постоянной времени ЭМП, определяемое в соответствии с выражением:

$$T_{\text{эм}} = \frac{T_{\text{кр}}}{5} \left(0,1 + 4,9k_{\chi} - 0,7\sqrt{49k_{\chi}^2 + 2k_{\chi} - 51} \right).$$

Выше была отмечена целесообразность превышения в 6 раз жесткости тяговой характеристики по сравнению с жесткостью характеристики сцепления. С учетом этого постоянная времени ЭМП, обеспечивающая требуемую настройку системы, определяется соотношением:

$$T_{\text{эм}} = 0,08T_{\text{кр}}. \quad (4.13)$$

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие требования к тяговому приводу.

Для обеспечения устойчивой работы привода при срыве сцепления и реализации коэффициента использования потенциальных условий сцепления не менее 0,9 во всем диапазоне рабочих скоростей локомотива необходимо:

— обеспечить превышение жесткости тяговой характеристики привода над жесткостью характеристики сцепления в начале ниспадающего участка, соответствующей малым (менее 5 км/ч) скоростям движения локомотива, по крайней мере в 6—6,5 раз, т.е.

относительная жесткость тяговой характеристики должна удовлетворять условию

$$\chi > 5,4 \text{ с/м};$$

— чтобы постоянная времени электромеханического преобразователя составляла не более 0,08—0,09 от критического значения, определяемого выражением (4.10).

С учетом сформулированных условий, а также конкретного типа АТД, расчетной скорости локомотива, осевой нагрузки и передаточного числа тягового редуктора, может быть определен коэффициент усиления регулятора скорости:

$$k_{\text{рс}} > k_{\chi} X \frac{R_{\text{к}}^2}{i_{\text{ред}}}.$$

Как было указано выше, значение относительной жесткости характеристики сцепления при низких скоростях движения равно $\chi = 0,9$, а $X = \psi_{\text{max}} \chi N$. Осевая нагрузка электровоза ЭП10 равна $N = 22,5$ т, радиус среднеизношенного бандажа по кругу катания $R_{\text{к}} = 0,6$ м. С учетом принятого значения $k_{\chi} = 6,5$ и максимального значения коэффициента сцепления $\psi_{\text{max}} = 0,4$, коэффициент усиления регулятора скорости должен быть не менее

$$k_{\text{рс}} > k_{\chi} X \frac{R_{\text{к}}^2}{i_{\text{ред}}} = 6,5 \cdot 22,5 \cdot 9810 \cdot 0,4 \cdot 0,9 \frac{0,6^2}{88/23} = 48\ 600,$$

а постоянная времени ЭМП не должна превышать

$$T_{\text{эм}} < 0,08 \frac{J_{\Sigma}}{N \psi_{\text{max}} \chi R_{\text{к}}^2} = 0,08 \frac{1655}{22,5 \cdot 9810 \cdot 0,4 \cdot 0,9 \cdot 0,6^2} = 0,004 \text{ с}.$$

Проиллюстрируем сформулированные выше условия устойчивости примерами моделирования. В модели тягового привода, составленной в соответствии со структурной схемой рис. 4.5, были установлены параметры АТП электровоза ЭП10 и учтена нелинейность характеристики сцепления, которая задана кусочно-линейной функцией, соответствующей характеристике сцепления при скорости локомотива 5 км/ч. Исследовалось поведение привода при изменении максимального коэффициента сцепления ψ_{max} от 0,4 до 0,2.

На рис. 4.7 приведены полученные в результате моделирования временные диаграммы изменения максимального и реализуемого

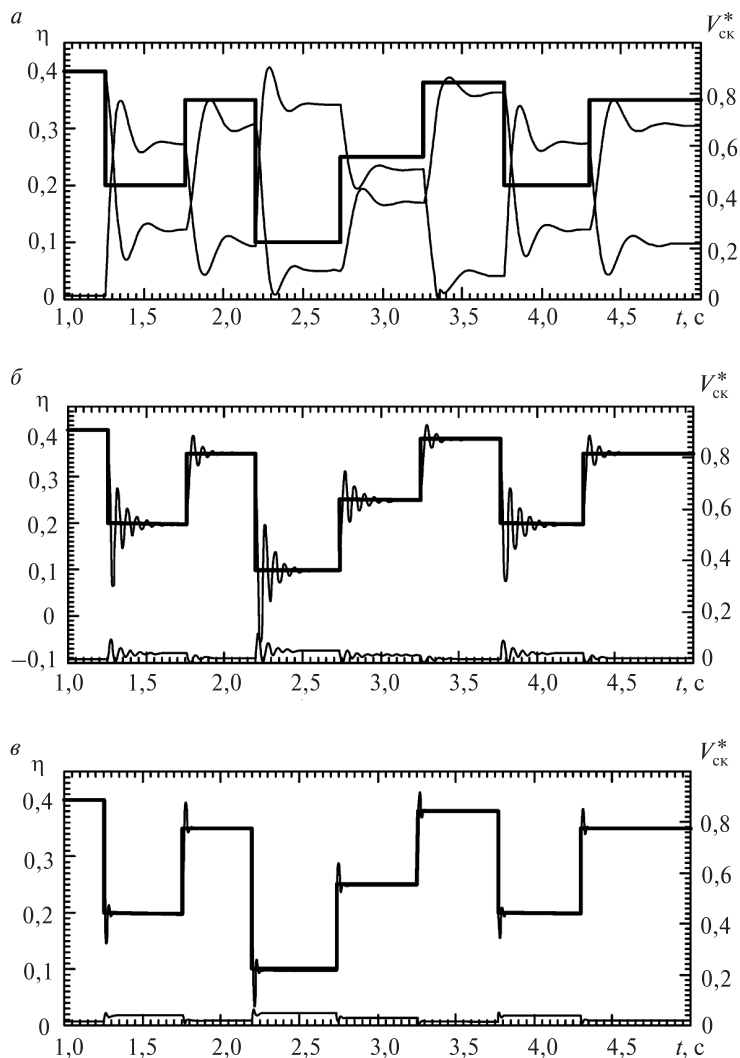


Рис. 4.7. Временные диаграммы изменения коэффициента сцепления и скорости проскальзывания при изменении условий сцепления при различных параметрах ЭМП: *a* — при $X_{тэп}/X = 1.5$; $T_{эм} = 0.03$ с; *б* — при $X_{тэп}/X = 6$; $T_{эм} = 0.03$ с; *в* — при $X_{тэп}/X = 6$; $T_{эм} = 0.004$ с

коэффициентов сцепления при изменяющихся условиях сцепления (при трех различных вариантах параметров ЭМП). Среднее значение максимального коэффициента сцепления за рассматриваемый интервал времени составило $\psi_{\max \text{ ср}} = 0,274$.

При превышении жесткостью тяговой характеристики жесткости характеристики сцепления в 1,5 раза и постоянной времени ЭМП $T_{\text{эм}} = 0,03$ с (диаграмма *а*) среднее значение реализуемого коэффициента сцепления на том же интервале было равно $\psi_{\max \text{ ср}} = 0,22$, что составляет 80 % от среднего значения максимально возможного коэффициента; при шестикратном превышении и $T_{\text{эм}} = 0,03$ с (диаграмма *б*) эти значения соответственно составили $\psi_{\max \text{ ср}} = 0,26$ и 95 %; при такой же жесткости, но $T_{\text{эм}} = 0,004$ с (диаграмма *в*) имеем $\psi_{\max \text{ ср}} = 0,27$ и 98 %.

Время регулирования в первых двух случаях (*а* и *б*) составило около 0,4 с, т.е. привод практически постоянно находился в динамическом режиме, который сопровождается значительными перерегулированиями, что неизбежно влечет возрастание динамических нагрузок. Кроме того, это ведет к возрастанию динамических потерь, т.е. к понижению КПД привода. В последнем случае (диаграмма *в*) время регулирования становится меньше 0,1 с, что ведет к снижению динамических нагрузок и потерь.

Среднее значение относительной скорости проскальзывания составило в первом случае 0,4, во втором и третьем — 0,03, т.е. при полуторакратном превышении жесткостью тяговой характеристики жесткости характеристики сцепления будет наблюдаться повышенный износ бандажей колесных пар.

На рис. 4.8 приведены полученные диаграммы перехода привода из рабочей точки *А*, лежащей на кривой сцепления 1, в точку *В* кривой 2. Первая диаграмма (*а*) соответствует превышению жесткостью тяговой характеристики жесткости характеристики сцепления в 1,5 раза. Постоянная времени ЭМП принята равной 0,03 с. Как видно из диаграммы, система устойчива, переходный процесс — апериодический, перерегулирование не превышает 5 %. Однако рабочая точка *В* расположена далеко от области наибольших значений коэффициента сцепления. Реализуемая сила тяги в этом случае составляет примерно 60 % от максимально возможной. Для повышения реализуемой силы тяги следует увеличить жесткость тяговой характеристики.

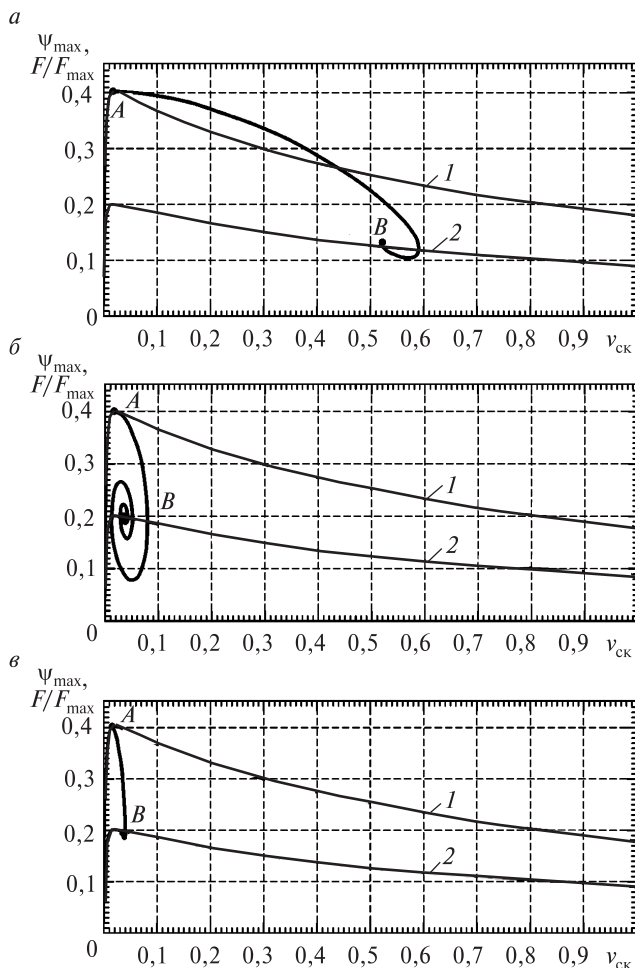


Рис. 4.8. Изменение коэффициентов сцепления и тяги при ухудшении условий сцепления при различных параметрах ЭМП: *a* — при $X_{\text{тэп}}/X = 1,5$; $T_{\text{эм}} = 0,03$ с; *б* — при $X_{\text{тэп}}/X = 6$; $T_{\text{эм}} = 0,03$ с; *в* — при $X_{\text{тэп}}/X = 6$; $T_{\text{эм}} = 0,004$ с

На второй диаграмме (*б*) приведен процесс перехода из точки *A* в *B* при превышении жесткостью тяговой характеристики жесткости характеристики сцепления в 6 раз. Постоянная времени электромеханического преобразователя, как и в предыдущем случае, принята равной 0,03 с. Очевидно, что рабочая точка *B* в этом случае расположена в области наибольших значений коэффици-

ента сцепления и реализуемая сила тяги близка к максимально возможной. Однако процесс приобрел колебательный характер. Перерегулирование составило порядка 100 %, произошло увеличение времени регулирования.

На третьей диаграмме (в) представлены процессы перехода при жесткости тяговой характеристики такой же, как в предыдущем случае, но при постоянной времени электромеханического преобразователя, равной 0,004 с. Процесс становится аperiodическим, перерегулирование не превышает 5 %, время регулирования минимально.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что для повышения использования сцепного веса локомотива необходимо, чтобы жесткость тяговой характеристики привода превышала жесткость характеристики сцепления не менее чем в 6 раз.

При сохранении быстродействия привода на низком уровне увеличение жесткости тяговой характеристики приводит к возрастанию колебательности, затягиванию времени перехода из одной рабочей точки в другую со значительным превышением скоростью проскальзывания своего установившегося значения, что может привести к перемежающемуся боксованию и в конечном итоге к недоиспользованию возможностей привода. Поэтому для более полного использования сцепного веса локомотива недостаточно только лишь повысить жесткость тяговых характеристик, наряду с этим необходимо увеличивать быстродействие привода, которое определяется быстродействием электромеханического преобразователя, постоянная времени которого должна лежать в пределах нескольких миллисекунд.

Достижение такого уровня быстродействия представляет серьезную проблему. Однако существует возможность смягчения требований к быстродействию привода путем увеличения критического значения постоянной времени электромеханического преобразователя, величина которого прямо пропорциональна суммарному моменту инерции вращающихся масс, приведенному к оси колесной пары (4.10). Момент инерции, в свою очередь, находится в квадратичной зависимости от передаточного числа редуктора, т.е. даже его незначительное увеличение приведет к значительному увеличению критического значения постоянной времени преобразователя.

Итак, для повышения тяговых свойств локомотивов — улучшения использования сцепного веса — целесообразно применять тяговые двигатели с жесткими механическими характеристиками, в частности асинхронные тяговые двигатели. Жесткость механических характеристик АТД во многом обуславливается способом управления, наибольшая жесткость достигается при управлении с постоянным магнитным потоком двигателя, что заставляет выбрать именно такой закон управления. Наряду с этим необходима стабилизация частоты вращения колесной пары путем введения отрицательной обратной связи по частоте вращения ротора. Повышение жесткости тяговой характеристики приводит к возрастанию колебательности привода, сопровождающейся ухудшением его динамических свойств. Избежать этого возможно путем увеличения быстродействия привода, что определяется быстродействием ЭМП.

4.3. Способы управления асинхронным тяговым приводом и их влияние на динамические свойства локомотива

4.3.1. Влияние способа регулирования АТД на вид его механической характеристики

Одной из особенностей асинхронной электрической машины является отсутствие явно выраженных магнито- и моментобразующих токов (как, например, у двигателя постоянного тока с независимым возбуждением) — обе эти функции выполняет ток статора. Существует несколько способов регулирования АТД, которые можно классифицировать следующим образом:

1) регулирование с заданным напряжением статора и постоянным абсолютным скольжением ротора ($U_s = \text{const}$, $\omega_r = \text{const}$). При этом способе регулирования механическая характеристика описывается выражением

$$M_{\text{эм}} = \frac{3}{2} p \frac{1}{L_r} \frac{(1-\sigma) T_r \omega_r U_s^2}{1 + \sigma^2 T_r^2 \omega_r^2 \omega_s^2}; \quad (4.14)$$

2) регулирование АТД с заданным главным потоком сцеплением ($\Psi_m = \text{const}$). В этом случае механическая характеристика соответствует выражению

$$M_{\text{эм}} = \frac{3}{2} p \frac{1}{L_r} \frac{T_r \omega_r}{\left(1 - \frac{L_m}{L_r'}\right)^2 T_r^2 \omega_r^2 + 1} \Psi_m^2; \quad (4.15)$$

3) регулирование АД с заданным потокосцеплением статора ($\Psi_s = \text{const}$). Механическая характеристика определяется выражением

$$M_{\text{эм}} = \frac{3}{2} p \frac{1}{L_s} (1 - \sigma) \frac{T_r \omega_r}{\sigma^2 T_r^2 \omega_r^2 + 1} \Psi_s^2; \quad (4.16)$$

4) регулирование АД с заданным потокосцеплением ротора ($\Psi_r = \text{const}$). Описание механической характеристики приобретает вид

$$M_{\text{эм}} = \frac{3}{2} p \frac{1}{L_r'} T_r \omega_r \Psi_r^2. \quad (4.17)$$

В выражениях (4.14)–(4.17) использованы следующие обозначения:

U_s, ω_s — величина и угловая частота напряжения, приложенного к обмотке статора;

ω_r — частота токов ротора (абсолютное скольжение);

$\omega = \omega_s - \omega_r$ — угловая частота вращения вала АД;

Ψ_s и Ψ_r — величина потокосцепления статора и ротора;

Ψ_m — величина главного потокосцепления;

p — число пар полюсов АД;

L_m — взаимная индуктивность обмоток статора и ротора (индуктивность намагничивания);

$L_{\sigma s}, L_{\sigma r}'$ — индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора (приведенные к статору);

$L_s = L_m + L_{\sigma s}, L_r' = L_m + L_{\sigma r}'$ — полные индуктивности обмоток статора и ротора (приведенные к статору);

r_s, r_r' — активные сопротивления обмоток статора и ротора (приведенные к статору);

$T_r = L_r' / r_r'$ — постоянная времени ротора;

$\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r'$ — коэффициент рассеяния.

На примере двигателя НТА-1200 (см. гл. 2) для указанных способов управления были построены механические характеристики при номинальном значении частоты тока статора.

При управлении АД с постоянством потокосцепления статора Ψ_s (рис. 4.9) момент имеет максимум, равный

$$M_{\max} = \frac{3}{4} p \frac{1}{L_s} \cdot \frac{1-\sigma}{\sigma} \Psi_s^2 \text{ при } \omega_r = \frac{1}{\sigma T_r},$$

при постоянстве главного потокосцепления Ψ_m — максимум, равный

$$M_{\max} = \frac{3}{4} p \frac{1}{L_r \sigma} \Psi_0^2 \text{ при } \omega_r = \frac{L'_r}{L_r \sigma T_r}.$$

При управлении АД с заданным напряжением статора U_s и постоянством абсолютного скольжения ротора двигатель имеет мягкую механическую характеристику, подобную характеристике двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением.

При управлении с постоянством потокосцепления ротора Ψ_r механическая характеристика АД подобна характеристике двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

Жесткость характеристик на рабочем участке в номинальном режиме при постоянстве главного потокосцепления и потокосцеплений статора и ротора различается незначительно и практически постоянна.

Выполненный анализ позволяет заключить, что для получения жестких механических характеристик АД регулирование двигателя необходимо осуществлять с постоянным магнитным потоком (способы 2, 3, 4).

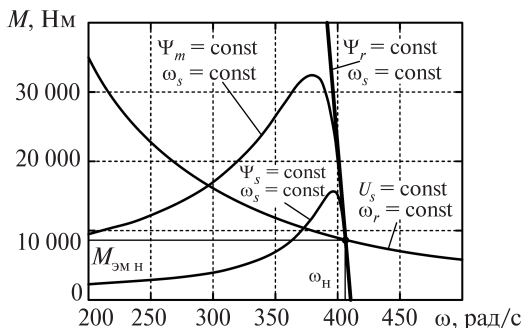


Рис. 4.9. Механические характеристики $M_{эм} = f(\omega)$ АД НТА-1200 при различных способах управления (номинальный режим: $\omega = \omega_H$, $M = M_{эмн}$)

Для максимального использования сил сцепления требуется высокое быстродействие привода, т.е. быстрое автоматическое согласование вращающего момента тягового двигателя с постоянно меняющимися условиями в месте контакта колеса с рельсом.

Быстродействие привода определяется быстродействием ЭМП, которое в свою очередь зависит от параметров двигателя, типа преобразовательной установки, способа управления; причем во многих случаях выбор оптимального способа управления является единственным средством в руках разработчиков тяговых приводов, позволяющим реализовать тот или иной уровень быстродействия. Поэтому при разработке привода необходимо знать, какими динамическими свойствами он будет обладать в случае реализации САР того или иного закона управления.

Управление АД в общем случае сводится к формированию трехфазной системы токов статора регулируемой величины и частоты, для чего используются статические преобразователи, причем форма токов определяется типом преобразователя. Для исключения влияния типа преобразовательной установки на динамические свойства ЭМП, рассмотрение процессов в ЭМП следует вести по основной гармонике. Поэтому далее при оценке влияния способов управления АД преобразовательная установка будет рассматриваться как идеализированный безынерционный трехфазный источник тока регулируемой величины и частоты.

4.3.2. Уравнения электромагнитных процессов в АД, применяемые при синтезе системы управления

Уравнения, описывающие электромагнитные и электромеханические процессы в АД, имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \vec{U}_s = \vec{I}_s r_s + \frac{d\vec{\Psi}_s}{dt} + j\omega_{\text{ск}} \vec{\Psi}_s; \\ \vec{U}_r = \vec{I}_r r_r + \frac{d\vec{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_{\text{ск}} - \omega) \vec{\Psi}_r, \end{cases} \quad (4.18)$$

где $\vec{U}_s, \vec{U}_r$ — результирующие векторы напряжений статора и ротора;

$\vec{I}_s, \vec{I}_r$ — результирующие векторы токов статора и ротора;

$\vec{\Psi}_s, \vec{\Psi}_r$ — результирующие векторы потокосцеплений статора и ротора;

r_s, r_r — активные сопротивления статора и ротора;

$\omega_{\text{ск}}$ — угловая скорость вращения системы координат.

Связь между токами и потокосцеплениями обмоток ротора и статора устанавливается системой уравнений

$$\begin{cases} \bar{\Psi}_s = L_s \bar{I}_s + L_m \bar{I}_r; \\ \bar{\Psi}_r = L_m \bar{I}_s + L'_r \bar{I}_r, \end{cases} \quad (4.19)$$

где L_s , L_r , L_m — индуктивности статора и ротора и взаимная индуктивность соответственно.

Электромагнитный момент на валу АД определяется выражением

$$M_{\text{эм}} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L'_r} \text{Im}(\bar{I}_s \bar{\Psi}_r). \quad (4.20)$$

Записанные выше уравнения составлены для результирующих векторов в системе координат, вращающейся с угловой скоростью $\omega_{\text{ск}}$.

Учитывая, что двигатель является асинхронной машиной с короткозамкнутым ротором, т.е. $\bar{U}_r = 0$, выражая $\bar{I}_r$ через $\bar{\Psi}_r$ и $\bar{I}_s$ из уравнений (4.19) и подставляя во второе уравнение (4.18), получаем выражение

$$\frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} = \frac{r'_r}{L_r} L_m \bar{I}_s - \frac{r'_r}{L_r} \bar{\Psi}_r - j(\omega_{\text{ск}} - \omega) \bar{\Psi}_r. \quad (4.21)$$

В зависимости от целей исследования, наиболее адекватного отражения условий работы асинхронной машины, а также стремления к максимальной простоте математического описания процессы в АД рассматривают в системе координат, вращающейся с той или иной угловой частотой. Эту частоту выбирают равной частоте вращения результирующего вектора какой-либо переменной АД или же равной нулю — неподвижную систему координат.

Если выбрать систему координат $d-q$, вращающуюся с угловой скоростью вектора $\bar{\Psi}_r - \omega_\Psi$, и сориентировать ее таким образом, чтобы действительная ось d совпала с вектором $\bar{\Psi}_r$ так, что проекции вектора $\bar{\Psi}_r$ будут равны $\Psi_{rd} = \Psi_r$, $\Psi_{rq} = 0$, то при таком выборе системы координат математическая модель АД обладает наибольшей простотой.

Выражение (4.21) в проекциях на оси выбранной системы координат принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_r}{dt} = \frac{r'_r}{L_r} L_m I_{sd} - \frac{r'_r}{L_r} \Psi_r, \\ 0 = \frac{r'_r}{L_r} L_m I_{sq} - \omega_r \Psi_r, \end{cases} \quad (4.22)$$

где $\omega_r = \omega_\Psi - \omega$ — угловая скорость вектора потокоцепления ротора;

$\tilde{\Psi}_r$ — угловая скорость вращения системы координат d – q относительно ротора.

После перехода к операторной форме записи (4.22) принимает вид:

$$\begin{cases} \Psi_r = \frac{L_m}{1 + T_r p} I_{sd}, \\ \omega_r = \frac{I_{sq}}{\Psi_r} \frac{L_m}{T_r}. \end{cases} \quad (4.23)$$

Выражение (4.20) при переходе к системе координат d – q принимает вид:

$$M_{эм} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L'_r} \Psi_r I_{sq}. \quad (4.24)$$

На рис. 4.10 показано взаимное расположение векторов потокоцепления ротора $\tilde{\Psi}_r$ и тока статора $\vec{I}_s$.

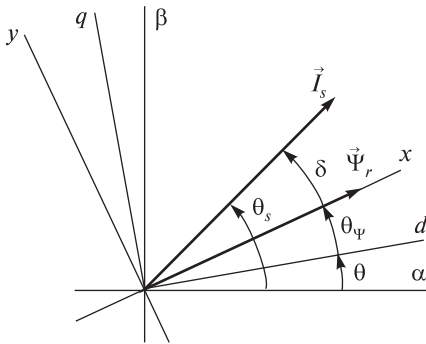


Рис. 4.10. Пространственное расположение векторов $\tilde{\Psi}_r$ и $\vec{I}_s$

Как было сказано выше, ось d совмещена с вектором $\tilde{\Psi}_r$. В этом случае системы координат d – q (связанная с ротором) и x – y (связанная с потокоцеплением ротора) совпадают и угол поворота системы координат d – q относительно ротора θ_Ψ равен нулю. В соответствии с рис. 4.10

$$\theta_s = \theta + \theta_\Psi + \delta,$$

где θ — угол поворота ротора в системе координат α – β ;

δ — угол между векторами $\vec{\Psi}_r$ и $\vec{I}_s$ (угол нагрузки).

Из последнего равенства имеем

$$\delta = \theta_s - \theta - \theta_\Psi,$$

или же

$$\delta = \int (\omega_s - \omega - \omega_r) dt. \quad (4.25)$$

Проекции тока статора на оси системы координат d – q выражаются следующим образом:

$$\begin{cases} I_{sd} = |\vec{I}_s| \cos \delta; \\ I_{sq} = |\vec{I}_s| \sin \delta. \end{cases} \quad (4.26)$$

Отметим, что полученная модель не позволяет адекватно отражать процессы в АД в отдельных режимах работы, в частности при учете реальных коммутационных функций статических преобразователей частоты. Кроме того, в такой модели затруднена индикация некоторых переменных АД, например ЭДС ротора.

Перейдем к построению модели АД в неподвижной системе координат. Она позволяет преодолеть отмеченные выше затруднения, хотя при этом является несколько более сложной.

Выражение (4.21) в проекциях на оси α – β примет вид:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = \frac{r'_r}{L_r} L_m I_{s\alpha} - \frac{r'_r}{L_r} \Psi_{r\alpha} - \omega \Psi_{r\beta}; \\ \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = \frac{r'_r}{L_r} L_m I_{s\beta} - \frac{r'_r}{L_r} \Psi_{r\beta} + \omega \Psi_{r\alpha} \end{cases} \quad (4.27)$$

или в операторной форме

$$\begin{cases} \Psi_{r\alpha} = \frac{1}{s} \left(\frac{r'_r}{L_r} L_m I_{s\alpha} - \frac{r'_r}{L_r} \Psi_{r\alpha} - \omega \Psi_{r\beta} \right); \\ \Psi_{r\beta} = \frac{1}{s} \left(\frac{r'_r}{L_r} L_m I_{s\beta} - \frac{r'_r}{L_r} \Psi_{r\beta} + \omega \Psi_{r\alpha} \right). \end{cases} \quad (4.28)$$

В соответствии с рис. 4.10, имеем

$$\theta_s = \theta + \theta_\psi + \delta = \int \omega_s dt. \quad (4.29)$$

Проекции тока статора на оси α и β выражаются как

$$\begin{cases} I_{s\alpha} = |\vec{I}_s| \cos \delta_s; \\ I_{s\beta} = |\vec{I}_s| \sin \delta_s. \end{cases} \quad (4.30)$$

Угловая частота тока ротора ω_r через проекции $I_{s\alpha}$ и $I_{s\beta}$ определяется как

$$\omega_r = \frac{1}{T_r} \cdot \frac{\Psi_{r\alpha} I_{s\beta} - \Psi_{r\beta} I_{s\alpha}}{\Psi_{r\alpha} I_{s\alpha} + \Psi_{r\beta} I_{s\beta}}, \quad (4.31)$$

угол нагрузки

$$\delta = \arctg \frac{\Psi_{r\alpha} I_{s\beta} - \Psi_{r\beta} I_{s\alpha}}{\Psi_{r\alpha} I_{s\alpha} + \Psi_{r\beta} I_{s\beta}}, \quad (4.32)$$

модуль потокосцепления ротора

$$\Psi_r = \sqrt{\Psi_{r\alpha}^2 + \Psi_{r\beta}^2}. \quad (4.33)$$

4.3.3. Системы автоматического регулирования АТП при постоянстве частоты скольжения, угла нагрузки и потокосцепления (способы 1—4)

Под электромеханическим преобразователем, как было оговорено выше, понимается асинхронный тяговый двигатель, питаемый преобразовательной установкой и управляемый САР. Для получения структурной схемы ЭМП к схеме АТД следует добавить схему САР, составленную на основании соотношений реализуемого закона управления — способа формирования входных сигналов I_s и ω_s . АТД является многомерным объектом управления с большим количеством переменных, это обуславливает множество способов управления им. Способ управления, реализуемый САР, во многом определяет свойства привода.

Исследуем влияние способов построения САР на динамические свойства ЭМП. Для получения количественных соотношений в

качестве объекта моделирования примем АТД НТА-1200. Расчеты произведем для номинальных значений параметров (см. табл. 2.1), исследуем режим изменения задания.

Первый способ — управление с заданием постоянства частоты скольжения ($\omega_r = \text{const}$). Выражения (4.28) для установившегося режима имеют вид

$$\begin{cases} \Psi_r = L_m I_{sd}; \\ \omega_r = \frac{I_{sq}}{\Psi_r} \frac{L_m}{T_r}. \end{cases} \quad (4.34)$$

С учетом (4.34), выражение (4.20) может быть записано в виде

$$M_{\text{эм}} = \frac{3}{2} p \frac{L_m^2}{L_r'} I_{sd} I_{sq},$$

или же с учетом (4.26),

$$M_{\text{эм}} = \frac{3}{4} p \frac{L_m^2}{L_r'} |\bar{I}_s|^2 \sin 2\delta. \quad (4.35)$$

Угол нагрузки δ выражается как

$$\delta = \arctg \frac{I_{sq}}{I_{sd}} = \arctg(\omega_r T_r).$$

Тогда выражение для электромагнитного момента примет вид

$$M_{\text{эм}} = \frac{3}{4} p \frac{L_m^2}{L_r'} |\bar{I}_s|^2 \sin(2 \arctg(\omega_r T_r)). \quad (4.36)$$

Таким образом, зафиксировав $\omega_r = \text{const}$ и регулируя величину $|\bar{I}_s|$, можно изменять величину электромагнитного момента $M_{\text{эм}}$. Алгоритм формирования сигналов $|\bar{I}_s|$ и ω_s согласно способу 1 и структурная схема системы управления, реализующей этот алгоритм, приведены в табл. 4.1 и на рис. 4.11, а.

На рис. 4.12 показано задание момента при включении (а) и при изменении задания (б), которое одинаково для всех рассмотренных далее случаев моделирования.

Алгоритмы формирования сигналов (способы 1 и 2)

Этап	Способ 1	Способ 2
1	Задается $\omega_r^* = \text{const}$	Задается $\delta^* = \text{const}$
2	По сигналу задания момента $M_{\text{эм}}^*$ (4.36) вычисляется сигнал задания $ \vec{I}_s ^*$: $ \vec{I}_s ^* = \sqrt{\frac{M_{\text{эм}}^*}{\frac{3}{4} p \frac{L_m^2}{L_r'} \sin(2 \arctg(T_r \omega_r))}} \quad (4.37)$	По сигналу задания момента $M_{\text{эм}}^*$ (4.35) вычисляется сигнал задания $ \vec{I}_s ^*$: $ \vec{I}_s ^* = \sqrt{\frac{M_{\text{эм}}^*}{\frac{3}{4} p \frac{L_m^2}{L_r'} \sin 2\delta}} \quad (4.38)$
3	Вычисляется $\omega_s^* = \omega_r^* + \omega$	С помощью регулятора угла РУ формируется сигнал $\Delta\omega_s$, поддерживающий угол нагрузки постоянным $\delta = \text{const}$: $\Delta\omega_s^* = \Delta\omega_r^* + \omega,$ где $\Delta\omega_r^*$ — выходной сигнал РУ, входом которого является разность $\Delta\delta = \delta^* - \delta$

На рис. 4.13 приведены диаграммы переходных процессов при пуске и изменении сигнала задания согласно способу 1. Этот способ позволяет реализовать также управление АТД по минимуму тока статора.

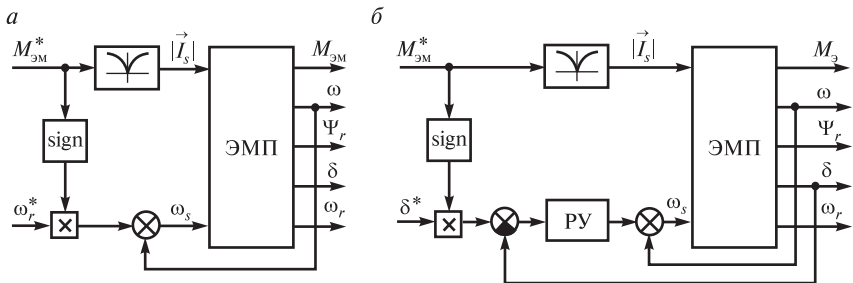


Рис. 4.11. Структурная схема системы управления по способам 1 (а) и 2 (б)

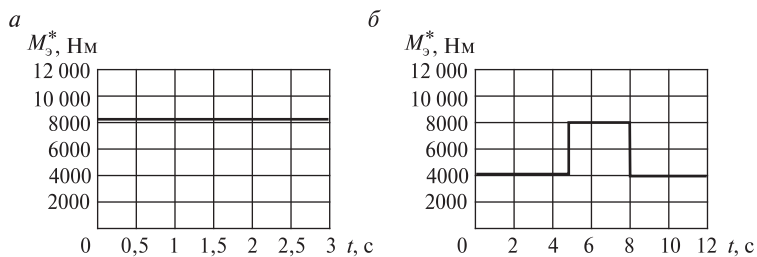


Рис. 4.12. Задание момента при включении (а) и при изменении задания (б)

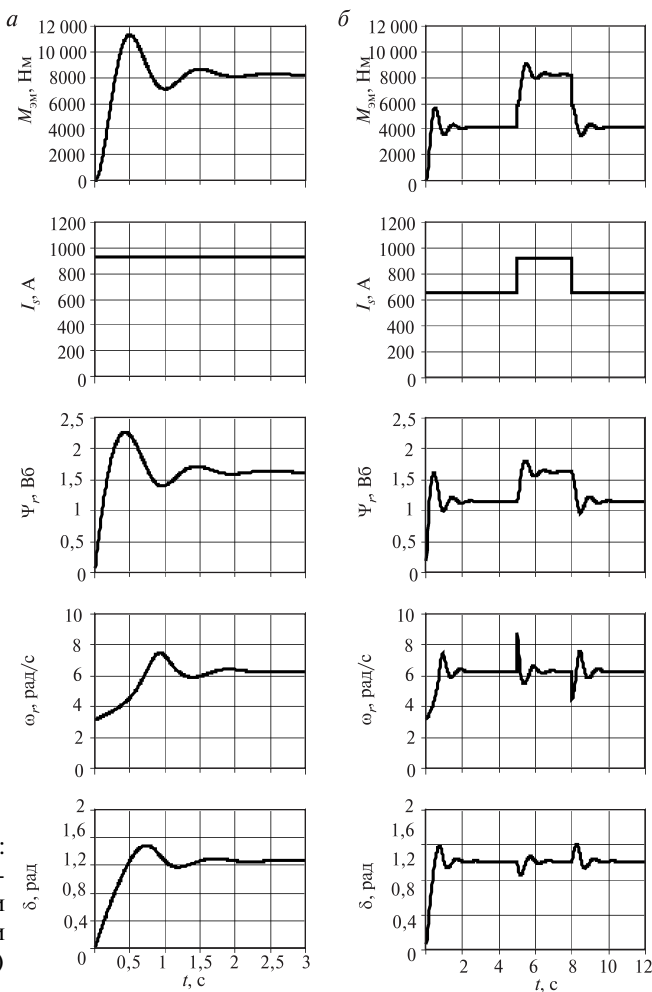


Рис. 4.13. Способ 1: диаграммы переходных процессов при включении (а) и при изменении задания (б)

На рис. 4.13, сверху вниз, показаны диаграммы переходных процессов (такой же порядок расположения принят на рис. 4.14, 4.16, 4.17, 4.19, 4.20): $M_{эм}$ — электромагнитного момента на валу двигателя, Нм; I_s — тока статора, А; Ψ_r — потокосцепления, ротора, Вб; ω_r — угловой частоты вращения ротора, рад/с; δ — угла нагрузки, рад.

Как видно из рис. 4.13, изменение электромагнитного момента происходит при одновременном изменении тока статора и потокосцепления ротора и квазипостоянных частоте скольжения ротора и угле нагрузки. При этом постоянство частоты скольжения ротора и угла нагрузки сохраняется лишь в статических режимах, в переходных процессах отклонения от заданной величины составляют 8—42 % для частоты скольжения и 10—15 % для угла нагрузки. Переходные процессы изменения электромагнитного момента, потокосцепления ротора, частоты скольжения ротора и угла нагрузки носят колебательный характер с перерегулированиями до 35 %. Это приводит к увеличению времени регулирования.

Второй способ — управление с постоянством угла нагрузки ($\delta = \text{const}$). В основу этого способа положено соотношение (4.35). По аналогии со способом 1, зафиксировав $\delta = \text{const}$, можно регулировать $M_{эм}$, изменяя $|\vec{I}_s|$.

Алгоритм формирования сигналов $|\vec{I}_s|$ и ω_s согласно способу 2 и структурная схема системы управления, реализующей этот алгоритм, приведены в табл. 4.1 и на рис. 4.11, б.

На рис. 4.14 показаны диаграммы переходных процессов при включении и изменении сигнала задания согласно способу 2. Этот способ, как и предыдущий, позволяет осуществлять регулирование АТД по минимуму тока статора. Условием такого регулирования является выполнение условия $\delta = \delta_{кр} = 45$ эл. градусов. При учете температурной зависимости активного сопротивления ротора и насыщения магнитной цепи это условие может быть представлено в виде $\delta = \delta_{кр}(t\text{ }^{\circ}\text{C}, L_m)$.

Как и в случае регулирования АТД по способу 1, изменение электромагнитного момента происходит при одновременном изменении тока статора и потокосцепления ротора. Однако при этом постоянство частоты скольжения ротора и угла нагрузки сохраняется как в статических, так и в переходных режимах. Это суще-

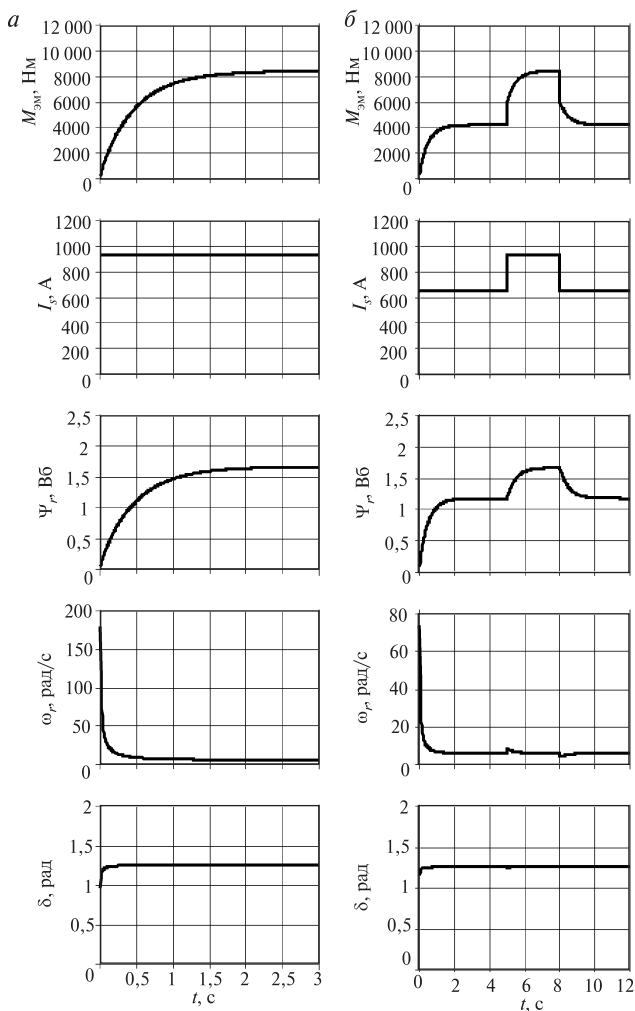


Рис. 4.14. Способ 2: диаграммы переходных процессов при включении (а) и при изменении задания (б)

ственно стабилизирует переходные процессы, однако мало влияет на время регулирования.

Третий способ управления основан на таком формировании сигналов $\bar{I}_s$ и ω_r при котором выполняется условие $\Psi_r = \text{const}$.

Найдем зависимость между $|\bar{I}_s|$ и ω_r , обеспечивающую выполнение условия $\Psi_r = \text{const}$. Положив $\bar{\Psi}_r = \text{const}$, т.е. $d\bar{\Psi}_r/dt = 0$, запишем выражение (4.21) в виде:

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{\Psi}_r}{L_m}(1 + j\omega_r T_r), \quad (4.39)$$

откуда

$$|\bar{I}_s| = \frac{\Psi_r}{L_m} \sqrt{1 + \omega_r^2 T_r^2}. \quad (4.40)$$

Подставляя моментобразующую составляющую тока I_{sq} из выражения (4.23) в (4.24), зависимость момента от угловой скорости вращения можно представить в виде:

$$M_{\text{эм}} = \frac{3}{2} p \frac{T_r}{L_r} \Psi_r^2 \omega_r. \quad (4.41)$$

Откуда ω_r , соответствующая заданному $M_{\text{эм}}$, выражается как

$$\omega_r = M_{\text{эм}} \frac{2L_r}{3pT_r} \frac{1}{\Psi_r^2}. \quad (4.42)$$

Таким образом, задавшись $\Psi_r^* = \text{const}$, необходимо регулировать $|\bar{I}_s|$ в зависимости от ω_r в соответствии с (4.40).

Алгоритм формирования сигналов по третьему способу и структурная схема системы управления, реализующей этот алгоритм, приведены в табл. 4.2 и на рис. 4.15, а.

Таблица 4.2

Алгоритмы формирования сигналов (способы 3 и 4)

Этап	Способ 3	Способ 4
1	Задается $\Psi_r^* = \text{const}$	Задается $\Psi_r^* = \text{const}$
2	Зная Ψ_r^* и $M_{\text{эм}}^*$, вычисляется ω_r^* в соответствии с (4.42)	Зная Ψ_r^* , вычисляется $I_{sd}^* = \frac{\Psi_r^*}{L_m}$
3	Зная Ψ_r^* и ω_r^* , формируется сигнал $ \bar{I}_s ^*$ в соответствии с (4.40)	По сигналу задания $M_{\text{эм}}^*$, зная Ψ_r^* , в соответствии с (4.24) вычисляется $I_{sq}^* = \frac{M_{\text{эм}}^*}{\Psi_r^*} \frac{2}{3} \frac{L_r'}{L_m} \frac{1}{p} \quad (4.43)$

Этап	Способ 3	Способ 4
4	Сигнал ω_s^* формируется как $\omega_s^* = \omega_r^* + \omega$	Вычисляется $ \vec{I}_s = \sqrt{I_{sd}^{*2} + I_{sq}^{*2}}$
5	—	В соответствии с $M_{эм}^*$, регулятором момента по разности $\Delta M = M_{эм}^* - M$ формируется сигнал задания ω_r^*
6	—	Угловая скорость вращения вектора тока статора формируется в виде суммы $\omega_s^* = \omega_r^* + \omega$

На рис. 4.16 показаны диаграммы переходных процессов в ЭМП при реализации способа 3. Как видно, изменение электромагнитного момента происходит при изменении тока статора и

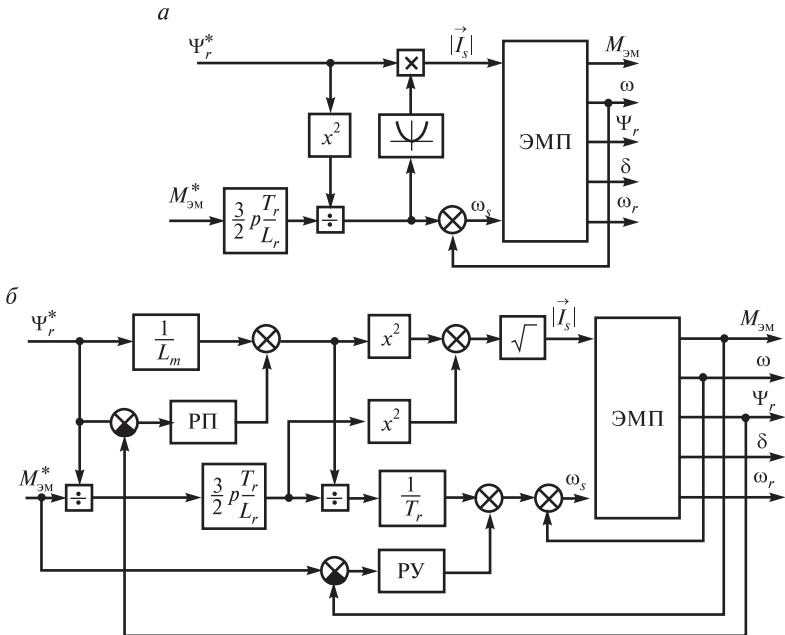


Рис. 4.15. Структурная схема системы управления по третьему (а) и четвертому (б) способам

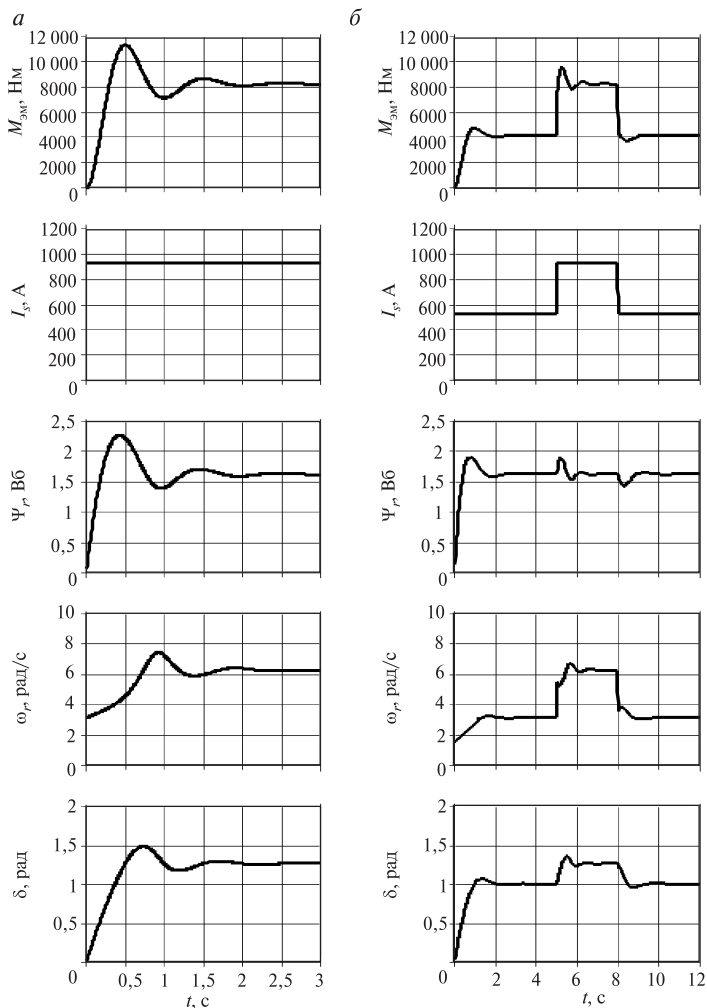


Рис. 4.16. Способ 3: диаграммы переходных процессов при включении (а) и при изменении задания (б)

квазипостоянном потокоцеплении ротора — постоянство потокоцепления сохраняется лишь в статических режимах. При этом наблюдается изменение частоты скольжения ротора и угла нагрузки пропорциональное изменению электромагнитного момента.

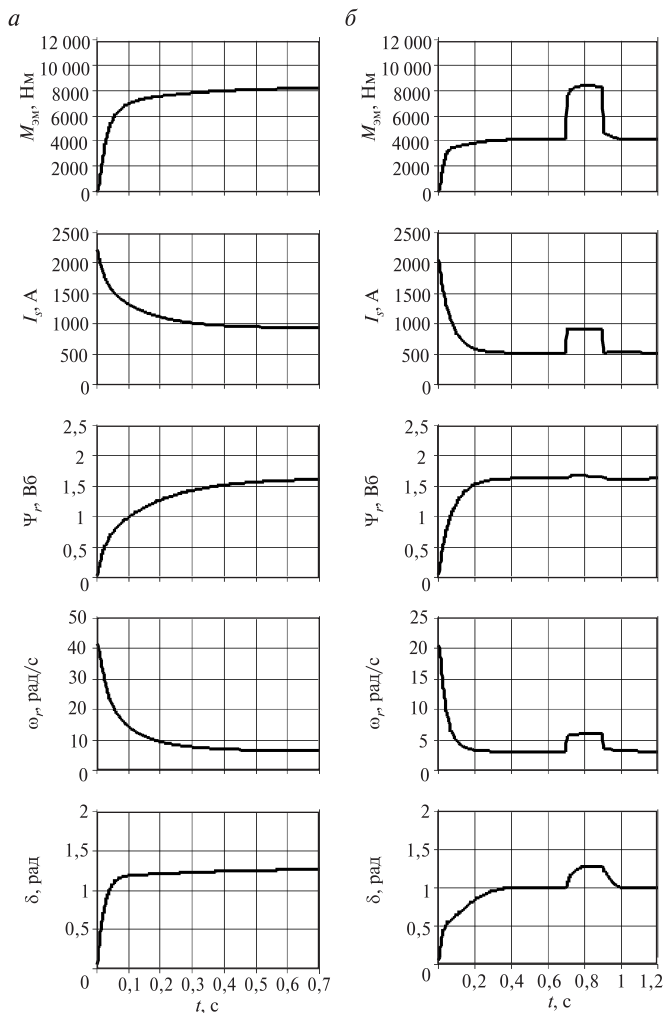


Рис. 4.17. Способ 4: диаграммы переходных процессов при включении (а) и изменении задания (б)

Переходные процессы изменения электромагнитного момента, потокосцепления ротора, частоты скольжения ротора и угла нагрузки носят колебательный характер с перерегулированиями до 25 %. Сравнивая способ 3 с ранее рассмотренными способами 1

и 2, можно отметить незначительное уменьшение времени регулирования.

Четвертый способ — управление при постоянном потокоцеплении ротора и коррекции частоты скольжения по моменту. В его основу положена зависимость (4.20). Он подобен способу 3 со следующими отличиями: для стабилизации магнитного потока используется сигнал обратной связи по потокоцеплению ротора, а для формирования сигнала ω_r^* используется обратная связь по моменту.

Алгоритм формирования сигналов по способу 4 и структурная схема системы управления, реализующей этот алгоритм, приведены в табл. 4.2 и на рис. 4.15, б.

На рис. 4.17 приведены диаграммы переходных процессов в ЭМП при реализации способа 4. Как видно из диаграмм, коррекция частоты скольжения по моменту приводит к существенной стабилизации переходных процессов и, как следствие, к сокращению времени регулирования: в 5 раз — при пуске и в 40 раз — при работе намагниченной машины по сравнению с ранее рассмотренными способами регулирования. Это объясняется выведением из динамических процессов высокоинерционного потокоцепления ротора.

4.3.4. Системы векторного управления АТП (способы 5 и 6)

Логическим развитием идеи, лежащей в основе способа 4, является принцип ориентации по полю. В соответствии с (4.20) электромагнитный момент прямо пропорционален векторному произведению векторов $\vec{I}_s$ и $\vec{\Psi}_r$. Следовательно, он зависит от величины и взаимного расположения векторов $\vec{I}_s$ и $\vec{\Psi}_r$ в пространстве и является функцией трех переменных:

$$M_{\text{эм}} = f(|\vec{I}_s|, \Psi_r, \delta) = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \Psi_r |\vec{I}_s| \sin \delta \quad (4.44)$$

или же

$$M_{\text{эм}} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \Psi_r I_{sq}. \quad (4.45)$$

Стабилизация $\bar{\Psi}_r$ приводит к тому, что электромагнитный момент зависит от величины тока статора $|\bar{I}_s|$ и угла нагрузки δ или, другими словами, от моментобразующей составляющей тока статора I_{sq} . Управляя этими переменными, можно получить требуемую величину $M_{эм}$.

Выражения (4.44) и (4.45) являются различными видами записи одной и той же зависимости: (4.44) записано в полярных координатах, а (4.45) — в декартовых, причем система координат вращается с угловой скоростью вращения вектора потокосцепления. На основе выражений (4.44) и (4.45) возможны два варианта построения САР, реализующих принцип ориентации по полю, или векторных САР.

Векторное управление АТД в полярных координатах (*пятый способ*) описывается алгоритмом работы САР, в основе которого лежит соотношение (4.44). Алгоритм формирования сигналов согласно способу 5 и структурная схема системы управления, реализующей этот алгоритм, приведены в табл. 4.3 и на рис. 4.18, а. Рис. 4.19 демонстрирует переходные процессы в ЭМП, САР которого реализует этот способ управления.

Таблица 4.3

Алгоритмы формирования сигналов (способы 5 и 6)

Этап	Способ 5	Способ 6
1	Задается $\Psi_r^* = \text{const}$	Задается $\Psi_r^* = \text{const}$
2	Зная Ψ_r^* , вычисляется $I_{sd}^* = \frac{\Psi_r^*}{L_m}$	Зная Ψ_r^* , вычисляется $I_{sd}^* = \frac{\Psi_r^*}{L_m}$
3	По сигналам задания $M_{э}^*$ и Ψ_r^* , вычисляется I_{sq}^* в соответствии с (4.24)	По сигналам задания $M_{э}^*$ и Ψ_r^* , вычисляется I_{sq}^* в соответствии с (4.24)
4	Вычисляется $ \bar{I}_s = \sqrt{I_{sd}^{*2} + I_{sq}^{*2}}$	Вычисляется $ \bar{I}_s = \sqrt{I_{sd}^{*2} + I_{sq}^{*2}}$

Этап	Способ 5	Способ 6
5	Вычисляется $\delta^* = \arctg \frac{I_{sq}^*}{I_{sd}^*}$	По сигналам I_{sd}^* и I_{sq}^* в соответствии с (4.23) и учитывая, что $\frac{\Psi_r}{L_m} = I_{sd}^*$, формируется сигнал угловой скорости вращения вектора потокоцепления: $\omega_r = \frac{I_{sq}^*}{I_{sd}^*} \frac{1}{T_r}$
6	По разности $\Delta\delta = \delta^* - \delta$ с помощью регулятора угла РУ формируется сигнал $d\delta^*/dt$	По разности $\Delta I_{sq} = I_{sq}^* - I_{sq}$ с помощью регулятора угла РУ формируется сигнал $d\delta^*/dt$
7	Сигнал задания угловой скорости вращения вектора тока статора формируется как сумма $\omega_s^* = \omega + \omega_r^* + \frac{d\delta^*}{dt}$	Сигнал задания угловой скорости вращения вектора тока статора формируется как сумма $\omega_s^* = \omega + \omega_r^* + \frac{d\delta^*}{dt}$

Алгоритм работы САР на основе (4.45) реализует векторное управление в декартовых координатах (*шестой способ*). Алгоритм формирования сигналов и схема системы управления, реализующей этот алгоритм, приведены в табл. 4.3 и на рис. 4.18, б.

Переходные процессы в ЭМП с использованием способа 6 приведены на рис. 4.20. Видно, что переходные процессы при регулировании АТД по способам 5 и 6 практически не отличаются. При этом они близки к процессам, протекающим при регулировании АТД по способу 4, с уменьшением времени регулирования при пуске более чем на 40 %.

Для анализа результатов, полученных при различных способах управления АТД, произведем сравнение следующих динамических показателей, принятых в теории автоматического управления: время нарастания t_n ; время первого максимума $t_{\max}$; время регулирования t_p ; перерегулирование σ ; колебательность.

Сравнение проведем по электромагнитному моменту (табл. 4.4).

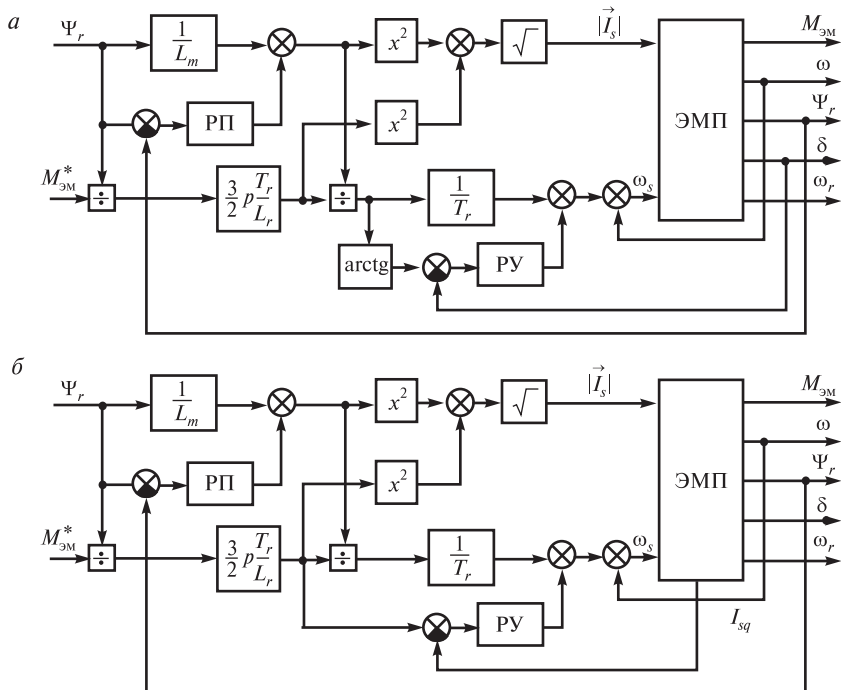


Рис. 4.18. Структурная схема системы управления по пятому (а) и шестому (б) способам

Таблица 4.4

Сравнение различных способов управления АД

Показатель	Способы управления					
	1	2	3	4	5	6
Включение						
$t_{\text{н}}, \text{с}$	0,297	—	0,296	—	—	—
$t_{\text{max}}, \text{с}$	0,499	—	0,499	—	—	—
$t_{\text{р}}, \text{с}$	1,563	1,407	1,563	0,290	0,202	0,201
$\sigma, \%$	37,5	—	27,3	—	—	—
Колебательность	2	—	2	—	—	—
Изменение задания						
$t_{\text{н}}, \text{с}$	0,295	—	0,06	—	—	—
$t_{\text{max}}, \text{с}$	0,483	—	0,267	—	—	—
$t_{\text{р}}, \text{с}$	0,670	0,845	0,840	0,021	< 0,0022	< 0,0022
$\sigma, \%$	10,9	—	15,1	—	—	—
Колебательность	1	—	1	—	—	—

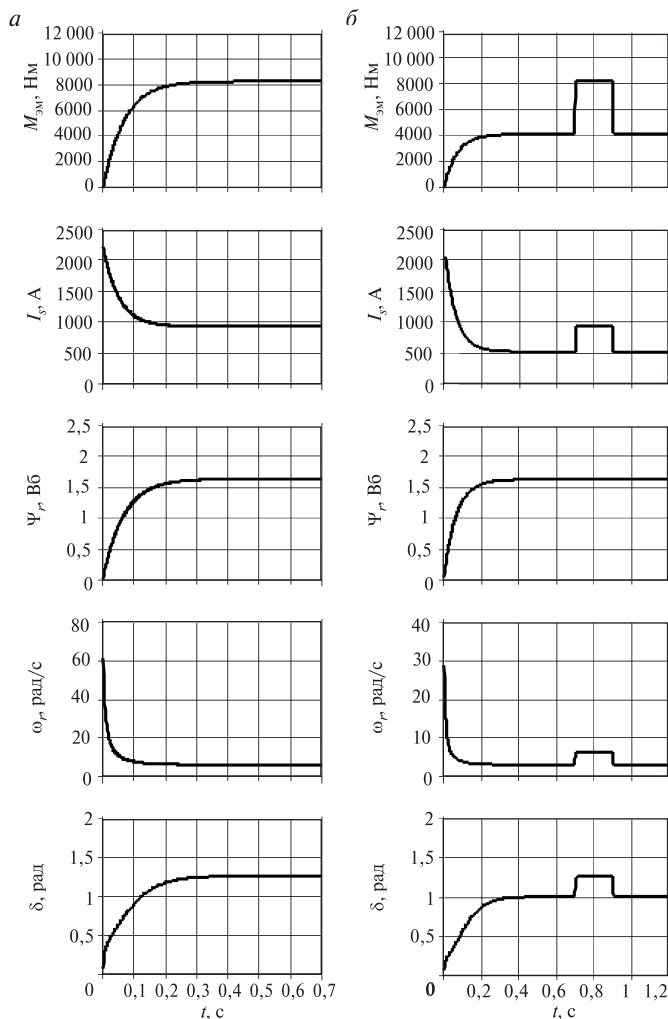


Рис. 4.19. Способ 5: диаграммы переходных процессов при включении (а) и при изменении задания (б)

Сравнение рассмотренных способов управления АТЭП позволяет сделать следующие выводы:

— динамические свойства тяговых электроприводов во многом определяются способами управления;

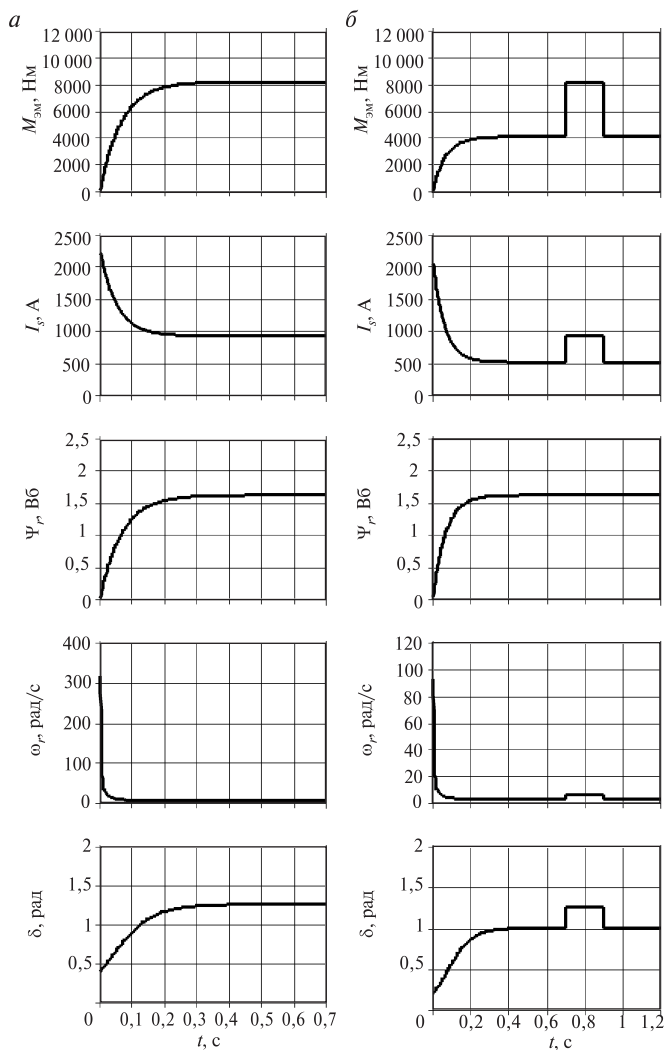


Рис. 4.20. Способ 6: диаграммы переходных процессов при включении (а) и при изменении задания (б)

— динамические свойства в значительной степени определяются контролем взаиморасположения векторов $\vec{I}_s$ и $\vec{\Psi}_r$, т.е. контролем угла нагрузки δ ;

- наилучшими динамическими свойствами обладают векторные системы управления, реализующие способы 5 и 6;
- стабилизация потокосцепления ротора ведет к улучшению динамических свойств;
- на основе проведенного исследования влияния способов регулирования на статическую и динамическую жесткость характеристик АТД можно сделать вывод о том, что для повышения тяговых свойств локомотива целесообразно использовать управление с заданным магнитным потоком.

4.3.5. Преимущества систем управления с автоматическим поддержанием постоянства магнитного потока

Результаты, полученные выше, позволяют сделать вывод о том, что системы управления, реализующие регулирование АТД с автоматическим поддержанием постоянства магнитного потока, позволяют достигать наиболее высоких тяговых свойств. Это подтверждается и приведенным ниже анализом существующих систем управления. При этом необходимо отметить многообразие возможных способов управления. Наибольшее распространение при практической реализации систем управления получили следующие способы:

- задание потокосцепления в зависимости от уставки тока статора и его стабилизация путем регулирования ЭДС;
- параметрическое задание постоянства потокосцепления ротора;
- автоматическое поддержание постоянства потокосцепления (векторное управление).

Для формулировки требований к системам управления перспективных локомотивов выполним сравнительный анализ указанных способов регулирования, изучив на математической модели поведение $|\vec{I}_s|$, Ψ_r , δ , ω_r и $M_{эм}$ при изменении задающего сигнала. При моделировании будем использовать параметры АТД НТА-1200.

Рассмотрим динамические процессы, происходящие при *ступенчатом уменьшении задания электромагнитного момента* от его номинального значения до половины и последующем возврате к номинальному (т.е. противоположно показанному на рис. 4.12, где было реализовано ступенчатое увеличение). Поступательная скорость локомотива принималась постоянной и равной 5 км/ч. На рис. 4.21 представлены результаты математического моделирования.

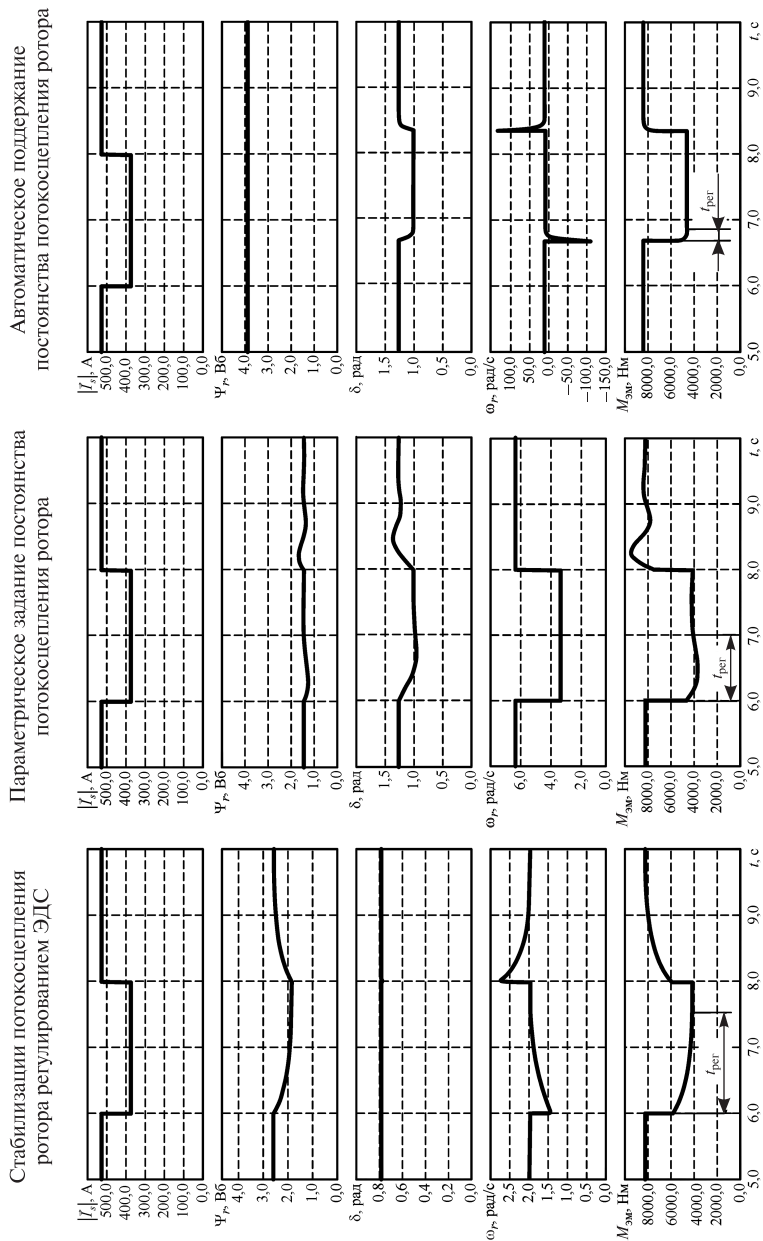


Рис. 4.21. Диаграммы поведения I_s , Ψ_r , δ , ω_r и $M_{\text{эм}}$ при изменении задающего сигнала

При задании потокосцепления ротора в зависимости от уставки тока статора и его стабилизации путем регулирования ЭДС происходит одновременное изменение тока статора и потокосцепления ротора при постоянстве угла нагрузки. Поддержание постоянства угла нагрузки обеспечивается изменением частоты скольжения ротора в переходных процессах. Динамика регулирования момента определяется изменением потокосцепления ротора — постоянной времени ротора.

Как видно из рис. 4.21, в процессе регулирования изменение потокосцепления ротора $\Delta\Psi_r$ составило 0,8 Вб ($\Psi_{r\max} = 2,7$ Вб — в начале регулирования и $\Psi_{r\min} = 1,9$ Вб — в конце); угол нагрузки δ оставался неизменным и равным 0,8 рад, что достигалось, как было отмечено выше, изменением частоты скольжения ротора в переходных процессах на 0,6 рад/с при частоте скольжения в статическом режиме 2 рад/с; электромагнитный момент изменялся аperiodически от 8000 до 4000 Н·м, при этом время регулирования составило 1,5 с.

При параметрическом задании постоянства потокосцепления ротора изменение момента обеспечивается изменением величины тока статора и угла нагрузки при сохранении постоянства потокосцепления ротора. При этом в динамических режимах наблюдается отклонение потокосцепления от заданного значения, что вызывает колебания момента и затягивает время регулирования. Это отклонение обусловлено отсутствием контроля за изменением угла нагрузки в переходных режимах, так как сигнал задания частоты тока статора формируется, опираясь лишь на статические зависимости.

В соответствии с рис. 4.21 в процессе регулирования изменение потокосцепления ротора $\Delta\Psi_r$ составило 0,3 Вб ($\Psi_{r\max} = 1,4$ Вб и $\Psi_{r\min} = 1,7$ Вб); угол нагрузки δ изменялся в пределах от 0,95 до 1,35 рад (в статическом режиме его значение $\delta = 1,25$ рад), при этом частота скольжения ротора изменялась от 6,2 до 3,8 рад/с; изменение электромагнитного момента носит колебательный характер с перерегулированием до 20 %, время регулирования при изменении момента от 8000 до 4000 Н·м составило 1 с.

Для устранения динамической ошибки регулирования угла нагрузки в динамических режимах частоту тока статора необходимо формировать с учетом его изменения:

$$\omega_s = \omega + \omega_r + \frac{d\delta}{dt},$$

что приведет к устранению колебаний потокосцепления ротора.

В этом случае будет устранено влияние изменения высокоинерционной моментобразующей составляющей тока — потокосцепления ротора. Тогда время регулирования момента будет определяться быстродействием контура регулирования тока статора (принят безынерционным) и быстродействием контура регулирования угла нагрузки. Именно таким образом функционирует система векторного управления, обеспечивающая автоматическое поддержание постоянства потокосцепления ротора.

Как видно из диаграмм, приведенных на рис. 4.21, для случая автоматического поддержания потокосцепления ротора, регулирование момента осуществляется при неизменном потокосцеплении ротора, причем в отличие от предыдущего способа управления постоянство потокосцепления обеспечивается не только в статических, но и в динамических режимах. Динамическая ошибка регулирования угла нагрузки практически отсутствует, это достигается кратковременным превышением частотой скольжения установившегося значения. В процессе регулирования потокосцепление ротора Ψ_r оставалось неизменным; угол нагрузки δ изменялся в пределах 1,3—1,0 рад; при этом изменения частоты скольжения ротора в переходных режимах достигали 115 рад/с за время менее 0,005 с; изменение электромагнитного момента имеет апериодический характер, время регулирования при изменении момента от 8000 до 4000 Н·м составило менее 0,01 с.

Выполненный анализ позволяет сделать вывод, что наибольшим временем регулирования обладает система управления, реализующая управление моментом при заданном потокосцеплении ротора в зависимости от уставки тока статора и его стабилизации путем регулирования ЭДС. При таком способе управления при изменении задания момента происходит изменение задания тока статора, что в свою очередь ведет к изменению потокосцепления ротора.

Время регулирования момента определяется временем изменения потокосцепления ротора и составляет не менее трех постоянных времени ротора, которая для мощных АТД составляет десятки доли секунды и может достигать единиц секунд.

Параметрическое задание постоянства потокосцепления ротора не устраняет изменения потокосцепления в динамических режимах, что приводит к затягиванию регулирования момента, время которого в этом случае составляет десятые доли секунды.

Лишь при автоматическом поддержании постоянства потокосцепления ротора удастся обеспечить неизменность потокосцепления не только в статических, но и в динамических режимах, что ведет к устранению влияния изменения потокосцепления на изменение момента. Время регулирования момента в этом случае будет ограничиваться лишь быстродействием контура регулирования тока статора. Это быстродействие определяется типом и конструкцией преобразователя и лежит в пределах от тысячных до сотых долей секунды, что говорит о возможности достижения быстродействия регулирования момента, удовлетворяющего требованиям, сформулированным выше в п. 4.1.2.

Следует отметить, что задание магнитного потока может осуществляться как путем задания главного потокосцепления, так и потокосцеплений статора или ротора.

4.4. Проектирование системы управления асинхронным тяговым приводом

4.4.1. Система автоматического регулирования АТП

Современные системы частотно-управляемых асинхронных электроприводов строятся по принципу подчиненного регулирования. Синтез САР для таких электроприводов имеет ряд специфических особенностей, поскольку асинхронный двигатель как объект управления чрезвычайно сложен. В связи с этим попытки синтеза САР АТП с применением традиционных аналитических и графоаналитических методов не привели к желаемому результату. По существу, единственным способом синтеза системы регулирования АТП является использование методов математического моделирования.

К настоящему времени разработан ряд вариантов систем автоматического управления частотно-регулируемыми асинхронными электроприводами, отличающихся друг от друга в основном способом ориентации системы координат, в которой осуществляется регулирование векторов напряжения, тока и потокосцепления двигателя. Применительно к АТП, как было отмечено выше, на-

иболее рациональной является система управления, построенная в системе координат, ориентированной по результирующему вектору потокоосцепления ротора двигателя. В этом случае модуль вектора потокоосцепления ротора двигателя определяется проекцией вектора тока статора на ось, связанную с вектором потокоосцепления ротора, а электромагнитный поток двигателя — произведением модуля потокоосцепления ротора двигателя на вторую (ортогональную) составляющую вектора тока статора. Таким образом, можно построить двухканальную четырехконтурную систему регулирования АТП с независимым управлением потокоосцеплением и электромагнитным моментом АТД.

Структура системы автоматического регулирования. Если $\Psi_{r\alpha}$ и $\Psi_{r\beta}$ — проекции вектора потокоосцепления ротора в неподвижной относительно статора системе координат α — β , то его модуль и угловое положение определяются соотношениями (4.33):

$$|\vec{\Psi}_r| = \sqrt{\Psi_{r\alpha}^2 + \Psi_{r\beta}^2}; \quad \cos \theta^* = \frac{\Psi_{r\alpha}}{|\vec{\Psi}_r|}; \quad \sin \theta^* = \frac{\Psi_{r\beta}}{|\vec{\Psi}_r|},$$

где θ^* — угол между вектором $\vec{\Psi}_r$ и осью α .

Узел в структуре электропривода, который производит эти вычисления, называют координатным индикатором (тригонометрическим анализатором).

С ротором АТД связана система координат d — q , угловая частота вращения которой относительно неподвижной системы координат α — β связана с углом θ между ними соотношением

$$\omega = 2\pi \frac{d}{dt} \theta(t).$$

Связь между составляющими векторов в системах координат α — β и d — q определяется соотношениями

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4.46)$$

где V_α , V_β , V_d , V_q — составляющие вектора $\vec{V}$ в системах координат α — β и d — q соответственно.

Если в соответствии с изложенным в п. 4.2 принципом совместить систему координат $x-y$, связанную с вектором потоко-сцепления, с системой координат $d-q$, связанной с ротором (т.е. вектор $\vec{\Psi}_r$ расположить вдоль вещественной оси d), то получим

$$\Psi_{rd} = |\vec{\Psi}_r|, \quad \Psi_{rq} = 0,$$

и положение вектора $\vec{\Psi}_r$ относительно неподвижной системы координат $\alpha-\beta$ будет определяться углом θ .

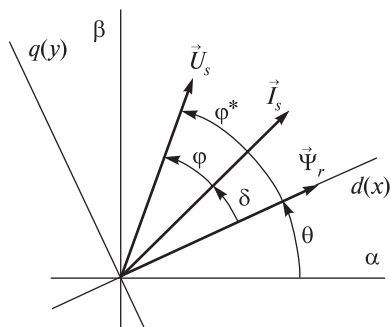


Рис. 4.22. Пространственное расположение векторов

В этом случае пространственное расположение векторов принимает вид, показанный на рис. 4.22, где δ — угол между векторами тока статора $\vec{I}_s$ и потоко-сцепления ротора $\vec{\Psi}_r$ (угол нагрузки); φ — угол между векторами тока $\vec{I}_s$ и напряжения статора $\vec{U}_s$. Угол φ^* определяет положение вектора напряжения статора $\vec{U}_s$ относительно оси d .

Процессы в асинхронной машине с короткозамкнутым ротором (т.е. при $\vec{U}_r = 0$) в системе координат $d-q$ описываются уравнениями (4.18), которые в этом случае принимают вид:

$$\begin{cases} \vec{U}_s = \vec{I}_s r_s + \frac{d\vec{\Psi}_s}{dt} + j\omega \vec{\Psi}_s, \\ 0 = \vec{I}_r r'_r + \frac{d\vec{\Psi}_r}{dt} + j\omega \vec{\Psi}_r. \end{cases} \quad (4.47)$$

Потоко-сцепление статора и ротора с учетом всех токов АД и независимо от выбранной системы координат можно представить в виде (4.19).

В уравнение для потоко-сцепления ротора входит ток ротора, который с учетом выражения для потоко-сцепления ротора равен

$$\vec{I}_r = \frac{\vec{\Psi}_r}{L'_r} - \frac{L_m}{L'_r L'_s} \vec{I}_s.$$

После подстановки тока ротора в (4.47) второе уравнение системы (4.47) примет вид:

$$\frac{L_m r'_r}{L'_r} = \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} \left(\frac{L'_r}{r'_r} + j\omega_r \right) \bar{\Psi}_r.$$

После преобразования Лапласа это уравнение принимает вид

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{\Psi}_r}{L_m} (1 + sT_r + j\omega_r T_r),$$

отсюда находим проекции вектора тока статора на оси d и q с учетом выбранного положения вектора потокосцепления ротора вдоль оси d (т.е. при $\Psi_{rd} = 0$):

$$I_{sd} = \frac{\Psi_{rd}}{L_m} (1 + sT_r), \quad I_{sq} = \frac{\Psi_{rd}}{L_m} (\omega_r T_r). \quad (4.48)$$

Тогда потокосцепление и угловая частота ротора будут равны

$$\Psi_{rd} = I_{sd} \frac{L_m}{1 + sT_r}, \quad \omega_r = I_{sq} \frac{L_m}{T_r \Psi_{rd}}.$$

Таким образом, с помощью проекции тока статора I_{sd} можно управлять потокосцеплением ротора. Передаточная функция этого канала соответствует аperiodическому звену с постоянной времени, равной постоянной времени ротора. С помощью проекции I_{sq} можно независимо и безынерционно управлять частотой ротора ω_r .

Электромагнитный момент на валу АД может быть найден через проекции тока статора и потокосцепления ротора на оси d и q с использованием (4.20). После подстановки выражения (4.48) для составляющей тока статора по оси q , получаем

$$M_{\text{эм}} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L'_r} \Psi_{rd} I_{sq} = \frac{3}{2} p \frac{\Psi_{rd}^2}{r'_r} \omega_r, \quad (4.49)$$

т.е. частота токов ротора при заданном потокосцеплении определяет электромагнитный момент АД.

С учетом полученных выражений может быть создана САР АД с прямой ориентацией по полю, структурная схема которой приведена на рис. 4.23.

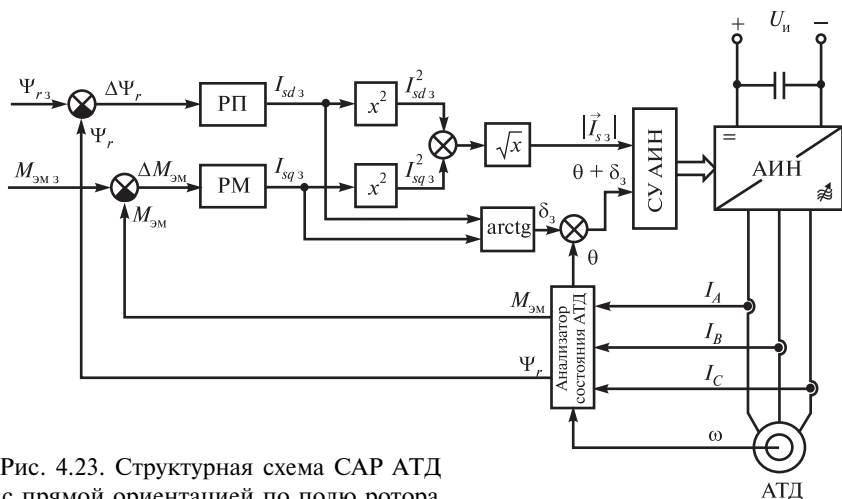


Рис. 4.23. Структурная схема САР АТД с прямой ориентацией по полю ротора

Входными сигналами САР являются задания потокосцепления ротора и электромагнитного момента на валу АТД (Ψ_{r3} и $M_{эм3}$). На вход регулятора потокосцепления (РП) подается разница между заданным и текущим потокосцеплением ротора (Ψ_r). Выходным сигналом регулятора потокосцепления является заданное значение составляющей тока статора по оси d (I_{sd3}). На вход регулятора момента (РМ) поступает разница между заданием момента и его текущим значением ($M_{эм}$), а его выходным сигналом является заданное значение составляющей тока статора по оси q (I_{sq3}).

По известным составляющим заданного тока статора и положению вектора $\vec{\Psi}_r$ (угол θ) формируются передаваемые в систему управления нижнего уровня АИН модуль тока статора $|\vec{I}_s|$ и его положение, определяемое как сумма угла θ и заданного значения угла нагрузки δ_3 , который вычисляется с использованием выражения

$$\delta_3 = \arctg \frac{I_{sq3}}{I_{sd3}}.$$

Текущие значения модуля потокосцепления ротора и его ориентация, момент АТД, составляющие тока статора по осям d и q определяются анализатором состояния АТД, имеющим структуру, приведенную на рис. 4.24.

Координатный преобразователь КП1 по измеренным токам фаз АТД I_A , I_B , I_C определяет проекции тока статора на оси α и β с использованием выражений

$$I_\alpha = I_A; \quad I_\beta = \frac{I_B - I_C}{\sqrt{3}}.$$

Идентификатор потоко-сцепления ротора определяет модуль и угол положения вектора Ψ_r относительно неподвижной системы координат α — β . Координатный преобразователь КП2 по известному углу θ и проекциям тока статора на оси α и β по выражениям (4.46) вычисляет проекции тока статора на оси d и q . Электромагнитный момент на валу АТД по известному потокосцеплению ротора и проекции тока статора на ось q рассчитывается по формуле (4.49). Определение потокосцепления ротора может быть выполнено с использованием уравнений (4.27).

При использовании такой САР автономный инвертор напряжения работает в режиме «токового коридора». Формирование задаваемого вектора тока статора осуществляется системой управления АИН нижнего уровня. Приведенная на рис. 4.23 САР подразумевает, что этот вектор задается своим модулем и угловым положением.

В ряде случаев бывает целесообразно вместо угла положения вектора тока статора использовать частоту скольжения ротора. Тогда при сохранении изложенных выше принципов регулирования система автоматического регулирования АТП принимает вид, показанный на рис. 4.25. САР такого типа можно отнести к системам с косвенной ориентацией по полю двигателя, так как требуемое положение вектора потокосцепления ротора получается путем регулирования скольжения.

На вход регулятора потокосцепления поступает разность между заданным и текущим значениями потокосцепления, а его выходным сигналом является задание составляющей тока статора по

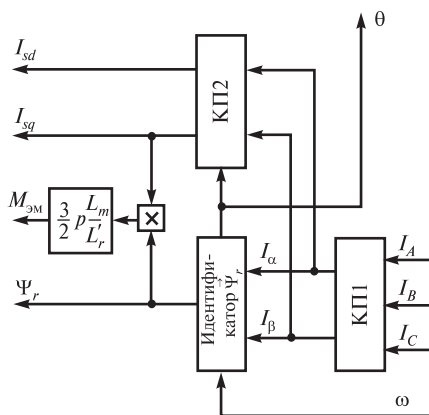


Рис. 4.24. Структурная схема анализатора состояния АТД

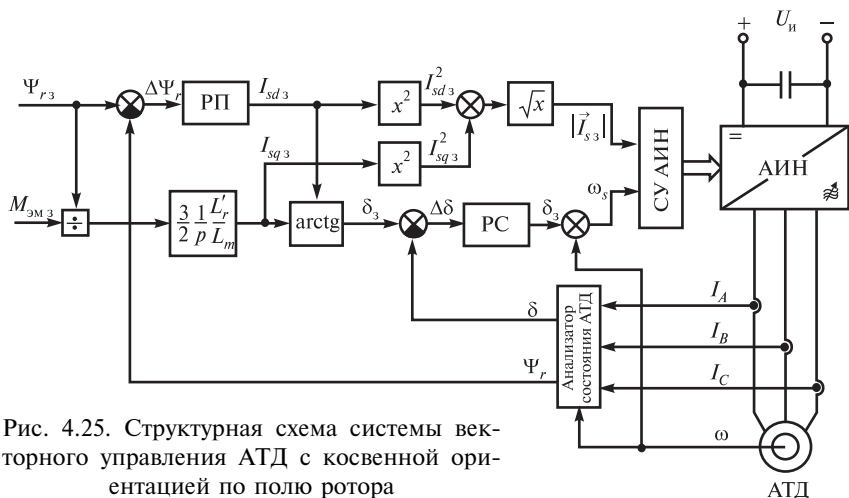


Рис. 4.25. Структурная схема системы векторного управления АТД с косвенной ориентацией по полю ротора

оси d . По заданным значениям электромагнитного момента и потокосцепления ротора в соответствии с (4.49) определяется величина составляющей тока задания статора по оси q . По известным проекциям заданного тока статора на оси d и q рассчитываются его модуль и задание угла нагрузки δ_3 . Разность между заданным и текущими значениями угла нагрузки $\Delta\delta$ поступает на вход регулятора скольжения (РС), выходным сигналом которого является скольжение ω_r . Оно складывается с измеренной частотой вращения ротора ω , итоговая величина ω_s является частотой работы АИН. Полученные значения тока и частоты подаются на вход системы управления нижнего уровня АИН, который, как и в предыдущем случае, работает в режиме «токового коридора».

В данной ситуации в качестве ПЧФ также может быть использован автономный инвертор тока. В таком случае регулятор поддерживает на заданном уровне ток в звене постоянного тока, пропорциональный $|\vec{I}_s|$, тогда как автономный инвертор тока, управляемый с частотой ω_s , выполняет функцию переключения фаз.

САР асинхронным двигателем, где используется непосредственное управление токами фаз статора (АИТ или АИН в режиме «токового коридора»), позволяет получить наилучшие динамические показатели системы, однако частота переключения СПП не контролируется и в определенных случаях может превышать до-

пустимые значения. Поэтому при использовании автономного инвертора напряжения в составе АТП целесообразно управлять им, формируя не вектор тока, а вектор напряжения.

Для управления АД с помощью проекций вектора напряжения статора на оси d – q используются следующие соотношения. Если координатная система вращается вместе с потокосцеплением ротора, то ее угловая частота равна ω , уравнение напряжения статора в системе координат d – q :

$$\vec{U}_s = r_s \vec{I}_s + \frac{d\vec{\Psi}}{dt} + j\omega \vec{\Psi}_s. \quad (4.50)$$

Выражая ток ротора из первого уравнения (4.19) в виде

$$\vec{I}_r = -\frac{\vec{\Psi}_r - \vec{I}_s L_m}{L'_r}$$

и подставляя его во второе уравнение (4.19), можно записать выражение для потокосцепления статора в виде

$$\vec{\Psi}_s = L_s (1 - k_s k_r) \vec{I}_s + k_r \vec{\Psi}_r = L'_s \vec{I}_s + k_r \vec{\Psi}_r, \quad (4.51)$$

где $k_s = L_m/L_s$ и $k_r = L_m/L'_r$ — коэффициенты связи статора и ротора;

$L'_s = L_s (1 - k_s k_r) = L_s \sigma$ — общая индуктивность рассеяния со стороны статора.

Подставляя (4.51) в (4.50) и выполняя преобразование Лапласа, уравнению (4.51) придадим вид:

$$\vec{U}_s = \vec{I}_s \left[r_s (1 + T'_s s) + j\omega \right] + k_r \vec{\Psi}_r (s + j\omega), \quad (4.52)$$

где $T'_s = L'_s/r_s$.

Разделяя действительные и мнимые части в уравнении (4.52) и учитывая, что $\Psi_{rq} = 0$, выражения для проекций напряжения статора запишем в виде

$$\begin{aligned} U_{sd} &= I_{sd} r_s (1 + T'_s s) - \omega L'_s I_{sq} + k_r \Psi_{rd} s; \\ U_{sq} &= I_{sq} r_s (1 + T'_s s) + \omega L'_s I_{sd} + k_r \Psi_{rd} \omega. \end{aligned} \quad (4.53)$$

Из (4.53) находим выражения для проекций тока статора I_{sd} и I_{sq}

$$\begin{aligned}
I_{sd} &= \frac{1}{r_s (1 + T'_s s)} \left(U_{sd} + \omega L'_s I_{sq} - s \Psi_{rd} k_r \right), \\
I_{sq} &= \frac{1}{r_s (1 + T'_s s)} \left(U_{sq} - \omega L'_s I_{sd} - k_r \omega \Psi_{rd} \right).
\end{aligned}
\tag{4.54}$$

Анализ выражений (4.53) и (4.54) показывает, что при управлении по напряжению АТД является нелинейным объектом с перекрестными связями. Если передаточную функцию тока статора по напряжению представить в виде

$$W_{Ia}^{Us}(s) = \frac{1/r_s}{T'_s s + 1}, \tag{4.55}$$

то при формировании структуры САР необходимо компенсировать взаимное влияние составляющих токов статора по осям d и q друг на друга и наличие внутренней ЭДС двигателя. Для этого, как следует из (4.53), напряжения на выходе регуляторов тока статора должны суммироваться с сигналами компенсации по осям d (ΔU_{sd}) и q (ΔU_{sq}), определяемым согласно выражениям

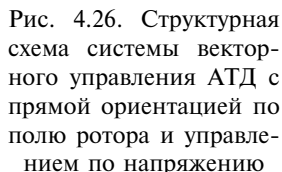
$$\begin{aligned}
\Delta U_{sd} &= -\omega L'_s I_{sq} + k_r \frac{d\Psi_{rd}}{dt}; \\
\Delta U_{sq} &= \omega L'_s I_{sd} + k_r \Psi_{rd} \omega.
\end{aligned}
\tag{4.56}$$

При создании САР, реализующей управление вектором напряжения, можно использовать регуляторы потокоцепления ротора и момента, непосредственно формирующие напряжения по осям d и q . Однако анализ системы, построенной по такому принципу, показал достаточно сильное влияние пульсаций напряжения и тока статора на протекающие процессы, что является следствием питания АТД от АИН с ШИМ. В диапазоне реально используемых значений частоты модуляции (500—1500 Гц) это приводит к необходимости значительно снижать быстродействие системы, чтобы избежать влияния высокочастотных составляющих тока и напряжения.

Применение фильтров разной степени сложности не приводит к существенному улучшению ситуации, так как вносит фазовые сдвиги в исходные сигналы и приводит к ухудшению динамичес-

Внешний контур формирует задание тока по соответствующей оси, а внутренний контур используется для регулирования напряжения, реализуя задание этого тока. В этом случае при использовании фильтров низкой частоты может быть реализована САР с управлением по напряжению с таким же быстродействием, как с управлением по току.

Исходными для работы САР являются сигналы задания потоко-сцепления ротора и электромагнитного момента на валу АТД. Так же, как и для САР с управлением по току, на вход регулятора потоко-сцепления подается разность между заданным и текущим значением потоко-сцепления ротора. Его выходным сигналом является задание составляющей тока статора по оси d , которое, в



свою очередь, является заданием для внутреннего контура регулирования тока. Составляющая вектора напряжения по оси d с его выхода суммируется с сигналом компенсации напряжения по этой оси, которое определяется блоком компенсации перекрестных связей.

Канал регулирования момента имеет аналогичную структуру. Задание составляющей тока статора по оси q подается на вход контура регулирования тока, на выходе которого формируется составляющая вектора напряжения статора по оси q .

Координатный преобразователь по известным проекциям вектора напряжения статора на оси системы координат d – q определяет его величину и положение с использованием выражений:

$$|\vec{U}_s| = \sqrt{U_{sd}^2 + U_{sq}^2}; \quad \varphi^* = \arctg \frac{U_{sq}}{U_{sd}}.$$

Полученные значения величины и положения вектора напряжения статора передаются на вход системы импульсно-фазового управления АИН, которая в соответствии с этим заданием формирует напряжение на выходе АИН.

С учетом того, что ротор АТД обладает достаточно большой постоянной времени, можно отказаться от учета незначительных изменений мгновенных значений потокосцепления ротора, приняв

$$\frac{d\Psi_{rd}}{dt} \approx 0,$$

что несколько упрощает структуру блока компенсации перекрестных связей. На структурной схеме САР (см. рис. 4.26) отсутствующие в этом случае элементы показаны пунктиром.

4.4.2. Синтез системы автоматического регулирования

В соответствии с описанными выше принципами регулирования АТД, структура САР имеет два канала регулирования — по потокосцеплению ротора и по электромагнитному моменту, для каждого из которых используется принцип подчиненного регулирования.

Управление электромагнитным моментом необходимо выполнять без перерегулирования, поскольку при работе в режиме, близ-

ком к срыву контакта «колесо—рельс», возможно развитие боксования. Поэтому при синтезе САР такого типа применяется коррекция на технический оптимум или оптимум по модулю. В этом случае передаточная функция разомкнутого контура должна иметь вид:

$$W_{\text{раз}}(s) = \frac{1}{2T_0(T_0s + 1)}, \quad (4.57)$$

где T_0 — некомпенсированная постоянная времени контура регулирования.

Величина некомпенсированной постоянной времени выбирается, во-первых, из условия устойчивости замкнутого контура с учетом дискретного характера работы преобразователя и, во-вторых, с учетом требования фильтрации высших гармонических составляющих в сигнале обратной связи по току.

При управлении АТД по напряжению внутренним контуром для каждого из каналов САР является контур регулирования тока статора.

На рис. 4.27 представлена структурная схема контура регулирования составляющей тока статора по оси d ; аналогичный вид имеет структура контура регулирования составляющей и по оси q . С учетом того, что в структуре САР предусмотрен блок компенсации перекрестных связей, в контуре регулирования

не учитываются влияние составляющей тока статора по другой оси и внутренней ЭДС АТД. В этом случае реакция тока статора на изменение напряжения описывается аperiодическим звеном первого порядка с передаточной функцией (4.55).

При синтезе системы управления необходимо учитывать, что АТД питается от инвертора, который можно рассматривать как дискретное устройство с периодом квантования T_{μ} , зависящим от периода модуляции. Для учета этого эффекта в структурную схему каждого из контуров регулирования тока статора вводится дополнительное аperiодическое звено первого порядка с передаточной функцией

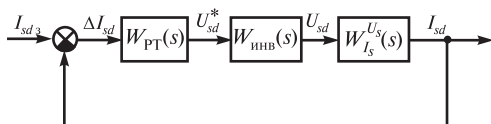


Рис. 4.27. Структурная схема контура регулирования составляющей тока статора по оси d

$$W_{\text{инв}}(s) = \frac{1}{T_{\mu}s + 1}. \quad (4.58)$$

Для работы в составе описанной САР контур регулирования тока должен быть высокодемпфированным динамическим звеном, передаточная функция которого может быть записана в виде:

$$W_I(s) = \frac{1}{T_0s + 1}.$$

Передаточная функция разомкнутого контура регулирования тока равна

$$W_{I\text{раз}}(s) = \frac{1}{T_0s}.$$

С учетом этого передаточная функция регулятора тока такова:

$$W_{\text{РТ}} = \frac{W_{I\text{раз}}(s)}{W_{\text{инв}} W_{Is}^{Us}(s)} = r_s \frac{T_{\mu} T'_s}{T_0} s + r_s \frac{T_{\mu} + T'_s}{T_0} + \frac{r_s}{T_0} \frac{1}{s}. \quad (4.59)$$

Таким образом, регулятор тока является пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором.

Если некомпенсированная постоянная времени контура регулирования тока намного больше периода квантования (на два порядка и более), можно считать инвертор непрерывным звеном и не учитывать его дискретный характер. Тогда постоянная времени дифференциальной части регулятора тока обращается в нуль ($T_{\mu} = 0$) и он становится пропорционально-интегральным регулятором.

Минимальное значение T_0 определяется периодом квантования инвертора. По разным оценкам оно должно быть в 6—10 раз больше, чем T_{μ} . При этом сохраняются требуемые динамические свойства системы, но устранение влияния высших гармонических составляющих токов в сигнале обратной связи требует фильтрации с использованием фильтров Баттерворта не ниже пятого-седьмого порядка, что повышает требования к быстродействию и, в особенности, к количеству разрядов управляющей ЭВМ. Поэтому целесообразно принимать в качестве минимального значения некомпенсированной постоянной контура регулирования тока

величину $10 - 30T_{\mu}$. Это позволяет получить приемлемое подавление высших гармоник в сигнале обратной связи при использовании достаточно простых в реализации цифровых фильтров.

Наличие дифференциальной составляющей регулятора тока приводит к значительному влиянию высокочастотных пульсаций тока на работу САР. Поэтому целесообразно принять $T_d = 0$, т.е. перейти к пропорционально-интегральному регулированию. При выбранном соотношении некомпенсированной постоянной времени контура регулирования тока и периода квантования инвертора, это не приводит к ухудшению динамических свойств ТЭП во всем диапазоне регулирования.

При синтезе второго (внешнего) контура канала регулирования потокосцепления ротора передаточная функция разомкнутого контура регулирования потокосцепления в соответствии с (4.57) имеет вид:

$$W_{\Psi_{\text{раз}}}(s) = \frac{1}{2T_0 s (T_0 s + 1)}. \quad (4.60)$$

Передаточная функция потокосцепления ротора по току статора согласно (4.48) равна

$$W_{\Psi_r}^{Id}(s) = \frac{L_m}{T_r s + 1}. \quad (4.61)$$

С учетом (4.60) и (4.61) передаточная функция регулятора потокосцепления

$$W_{\text{РП}}(s) = \frac{W_{\Psi_{\text{раз}}}(s)}{W_{\Psi_r}^{Id}(s) W_I(s)} = \frac{T_r s + 1}{2T_0 L_m s}. \quad (4.62)$$

Структурная схема канала регулирования потокосцепления ротора приведена на рис. 4.28.

Передаточная функция разомкнутого контура регулирования момента имеет тот же вид, что и для канала регулирования потокосцепления

$$W_{M_{\text{раз}}}(s) = \frac{1}{2T_0 s (T_0 s + 1)}.$$

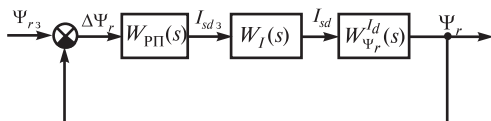


Рис. 4.28. Структурная схема канала регулирования составляющей потокосцепления ротора

При выполнении условия $\Psi_r = \text{const}$ передаточная функция момента по току статора (составляющей по оси q) соответствует пропорциональному звену с коэффициентом передачи, определяемым

в соответствии с (4.49):

$$W_{MЭМ}^{Iq}(s) = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r'} \Psi_r. \quad (4.63)$$

С учетом этого передаточная функция регулятора момента имеет вид:

$$W_{PM}(s) = \frac{W_{M\text{раз}}(s)}{W_{MЭМ}^{Iq} W_I(s)} = \frac{2L_r'}{6T_0 p L_m \Psi_r} \frac{1}{s}. \quad (4.64)$$

На рис. 4.29 приведена структурная схема контура регулирования электромагнитного момента на валу АТД.

Как видно из (4.64), параметры регулятора момента зависят от потокосцепления ротора, которое в свою очередь является регулируемой величиной. Его изменение в процессе работы ТЭП может привести к появлению перекрестных связей между каналами регулирования потокосцепления ротора и момента и вызвать изменение динамических свойств системы. Поэтому необходимо настраивать канал регулирования потокосцепления ротора таким образом, чтобы обеспечить стабилизацию потокосцепления с максимально доступным быстродействием. Также, в режиме ослабления поля постоянная времени интегральной части регулятора момента должна корректироваться в соответствии с оцениваемым или зада-

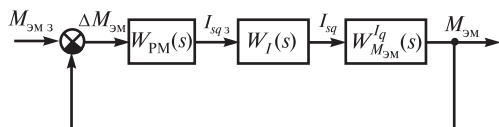


Рис. 4.29. Структурная схема контура регулирования электромагнитного момента на валу АТД

ваемым значением потокосцепления ротора, что позволит сохранить требуемую динамику изменения момента.

При управлении АТД по току с прямой ориентацией по полю ротора

синтез регуляторов потокосцепления и момента выполняется по той же методике, что и при управлении по напряжению. В этом случае АИН работает в режиме «токового коридора». Особенностью работы САР является то, что уже при ширине «коридора» порядка 5—7 % от номинального значения фазного тока статора количество переключений достигает 30—50 за период. Поэтому можно считать, что регулирование составляющих тока статора по осям d и q происходит безынерционно. Это позволяет упростить синтез САР, так как каналы регулирования потокосцепления ротора и момента получаются одноконтурными, и получить наилучшие динамические показатели привода.

При синтезе регулятора потокосцепления ротора передаточная функция разомкнутого контура регулирования потокосцепления имеет вид:

$$W_{\Psi_{\text{раз}}}(s) = \frac{1}{T_{\Psi_r} s},$$

где T_{Ψ_r} — некомпенсированная постоянная времени контура регулирования потокосцепления ротора.

С учетом (4.61) передаточная функция регулятора потокосцепления при управлении по току:

$$W_{\text{РП}}(s) = \frac{W_{\Psi_{\text{раз}}}(s)}{W_{\Psi_r}^{Id}(s)} = \frac{T_r s + 1}{T_{\Psi_r} L_m s}.$$

При условии, что передаточная функция разомкнутого контура регулирования момента

$$W_{M_{\text{раз}}}(s) = \frac{1}{T_{\text{эм}} s}$$

(здесь $T_{\text{эм}}$ — некомпенсированная постоянная времени контура регулирования момента), передаточная функция регулятора момента при управлении по току будет равна:

$$W_{\text{РМ}}(s) = \frac{W_{M_{\text{раз}}}(s)}{W_{M_{\text{эм}}}^{Iq}(s)} = \frac{L'_r}{3p L_m \Psi_r T_{\text{эм}}} \frac{1}{s}. \quad (4.65)$$

При такой настройке регуляторов перерегулирование отсутствует, а время переходного процесса составляет порядка $3T_{\text{эм}}$.

Структура каналов регулирования потокосцепления ротора и момента при токовом управлении аналогична приведенным на рис. 4.28 и 4.29 структурным схемам этих каналов при управлении по напряжению. В них должны быть исключены звенья, соответствующие контурам регулирования составляющих тока.

При реализации САР с токовым управлением и косвенной ориентацией по полю ротора регулятор потокосцепления синтезируется так же, как и для системы с прямой ориентацией по полю ротора.

Регулирование скольжения осуществляется следующим образом. Величина скольжения АД, подаваемая на вход системы управления нижнего уровня инвертора, имеет две составляющих. Одна из них определяется с использованием выражения (4.49) для заданного значения электромагнитного момента по формуле

$$\omega_{rc} = \frac{M_{эмз} 2r'_r}{3p\Psi_r^2}. \quad (4.66)$$

В этом выражении целесообразно использовать не величину потокосцепления ротора, определяемую анализатором состояния АД, а заданное значение потокосцепления ротора, так как это позволяет исключить взаимное влияние каналов регулирования потокосцепления и момента друг на друга.

Вторая составляющая, компенсирующая ошибку регулирования в динамических режимах, формируется регулятором скольжения. Передаточная функция угла нагрузки по скольжению АД, необходимая для его синтеза, может быть получена из выражения для составляющей тока I_{sq} в (4.48). С учетом того, что $I_{sq} = I_s \sin \delta$, можно записать

$$\sin \delta = \frac{T_r \Psi_r}{L_m I_s} \omega_r. \quad (4.67)$$

В окрестности некоторого значения δ^* для малых приращений δ справедливо соотношение

$$\sin(\delta^* + \Delta\delta) \approx \Delta\delta \cos \delta^*.$$

Тогда выражение (4.67) можно записать в виде

$$\Delta\delta \cos \delta^* = \frac{T_r \Psi_r}{L_m I_s} \Delta\omega_r,$$

а передаточная функция угла нагрузки по скольжению для малых отклонений в окрестности некоторого значения δ^* будет соответствовать пропорциональному звену

$$W_{\omega_r}^{\delta}(s) = \frac{1}{\cos \delta^*} \frac{T_r \Psi_r}{L_m I_s}.$$

Учитывая, что передаточная функция разомкнутого контура регулирования скольжения

$$W_{\text{PCраз}}(s) = \frac{1}{T_{\text{ЭМ}} s},$$

передаточная функция регулятора скольжения принимает вид:

$$W_{\text{PC}}(s) = \frac{W_{\text{PCраз}}(s)}{W_{\omega_r}^{\delta}(s)} = \frac{\cos \delta^* L_m I_s}{T_{\text{ЭМ}} T_r \Psi_r} \frac{1}{s}. \quad (4.68)$$

В соответствии с описанными принципами регулирования структурная схема канала регулирования скольжения АТД при управлении по току с косвенной ориентацией по полю ротора имеет вид, приведенный на рис. 4.30.

В выражение (4.68) входят величины δ^* , I_s и Ψ_r , зависящие от текущего состояния АТД. Поэтому настройка регулятора скольжения должна меняться в процессе работы САР. Однако, с учетом того, что величина формируемой им составляющей скольжения значительно меньше величины составляющей, определяемой по (4.66), параметры регулятора скольжения рассчитываются для номинальных значений потокоцепления ротора, тока статора и угла нагрузки, после чего они остаются неизменными, что обеспечивает приемлемые динамические показатели регулирования при реально используемых показателях быстродействия САР.

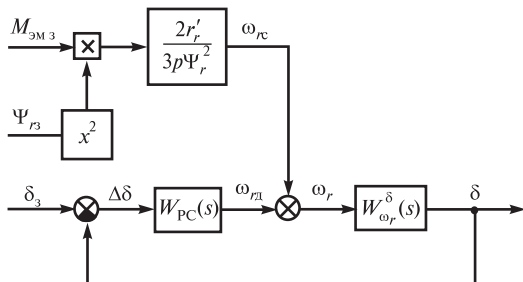


Рис. 4.30. Структурная схема канала регулирования угла нагрузки

Сравнение САР с управлением по току и по напряжению показывает, что динамические свойства привода являются идентичными. При реализации САР с управлением по напряжению, величина некомпенсированной постоянной времени должна быть примерно в 2 раза меньше, чем при управлении по току, из-за наличия внутреннего контура регулирования тока, снижающего общее быстродействие системы. Это позволяет получить в обоих случаях одинаковое время переходного процесса.

В настоящее время в системах управления широко используются микропроцессоры, в результате чего работа САР имеет дискретный характер. Поэтому ниже рассмотрен один из возможных вариантов алгоритма реализации цифровых пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов, используемый в дальнейшем при математическом моделировании процессов в АТП.

Использование описанных выше регуляторов потокосцепления, тока и момента требует реализации в управляющей программе законов регулирования вида

$$W(s) = K_{\Pi} \left(1 + \frac{1}{T_{\text{и}}} + T_{\text{д}} s \right),$$

т.е. требует решения уравнения

$$y(t) = K_{\Pi} \left[x(t) + \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^t x(t) dt + T_{\text{д}} \frac{dx}{dt} x(t) \right], \quad (4.69)$$

где $x(t)$ и $y(t)$ — сигналы на входе и выходе регулятора;

K_{Π} — коэффициент при пропорциональной части ПИД-регулятора. В приведенных уравнениях он, так же как и коэффициенты при интегральной и дифференциальной частях регулятора, является исходной информацией.

Для малых периодов дискретизации ΔT это уравнение может быть преобразовано в разностное. При использовании метода прямоугольников для аппроксимации непрерывного интеграла запишем уравнение (4.69) в дискретном виде:

$$y_n = K_{\Pi} \left[x_n + \frac{\Delta T}{T_{\text{и}}} \sum_{i=0}^{n-1} x_i + \frac{T_{\text{д}}}{\Delta T} (x_n - x_{n-1}) \right]. \quad (4.70)$$

Для реализации программ закона регулирования в управляющей ЭВМ целесообразно использовать рекуррентный алгоритм. Он характеризуется тем, что для вычисления текущего значения сигнала y_n используется его предыдущее значение y_{n-1} и поправочный коэффициент, не требующий существенных вычислительных затрат. С учетом (4.70) он имеет вид:

$$\begin{aligned} y_n - y_{n-1} &= y_n - K_{\Pi} \left[x_{n-1} + \frac{\Delta T}{T_{\text{и}}} \sum_{i=0}^{n-2} x_i + \frac{T_{\text{д}}}{\Delta T} (x_{n-1} - x_{n-2}) \right] = \\ &= K_{\Pi} \left[x_n - x_{n-1} + \frac{\Delta T}{T_{\text{и}}} x_{n-1} + \frac{T_{\text{д}}}{\Delta T} (x_n - 2x_{n-1} + x_{n-2}) \right] = \\ &= K_{\Pi} \left[\left(1 + \frac{T_{\text{д}}}{\Delta T} \right) x_n + \left(\frac{\Delta T}{T_{\text{и}}} - 1 + 2 \frac{T_{\text{д}}}{\Delta T} \right) x_{n-1} + \frac{T_{\text{д}}}{\Delta T} x_{n-2} \right]. \end{aligned}$$

Принимая

$$b_0 = K_{\Pi} \left(1 + \frac{T_{\text{д}}}{\Delta T} \right); \quad b_1 = K_{\Pi} \left(\frac{\Delta T}{T_{\text{и}}} - 1 + 2 \frac{T_{\text{д}}}{\Delta T} \right) x_{n-1}; \quad b_2 = K_{\Pi} \frac{T_{\text{д}}}{\Delta T}$$

и перенося y_{n-1} в правую часть, получаем «скоростной» алгоритм для программной реализации регулятора:

$$y_n = y_{n-1} + b_0 x_n + b_1 x_{n-1} + b_2 x_{n-2}. \quad (4.71)$$

4.4.3. Пример синтеза системы автоматического регулирования асинхронного тягового привода

С использованием изложенной методики был выполнен синтез САР асинхронного тягового привода, имеющего в своем составе АТД НТА-1200.

Возмущающим сигналом для такой САР является изменение частоты вращения ротора. Скорость ее изменения зависит от режима работы электровоза, возникновения боксования или юза колесных пар и т.п. При этом САР должна иметь такое быстроедействие, которое позволяло бы ей сохранять устойчивость и обеспечивать формирование заданного момента АТД с минимальной динамической ошибкой, без колебаний и перерегулирования.

Из уравнения вращения колесной пары (4.5) видно, что изменение частоты вращения определяется разностью электромагнитного момента и момента полезной нагрузки, а также инертностью системы «ротор АТД — редуктор — колесная пара». Очевидно, что максимальная скорость изменения частоты вращения ротора АТД будет иметь место при отсутствии момента полезной нагрузки на его валу. Тогда из (4.5) находим угловое ускорение ротора в виде

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{\text{эм}}}{J_{\text{рот}\Sigma}},$$

где $J_{\text{рот}\Sigma} = J_{\text{рот}} + J_{\text{мш}} + \frac{1}{i^2_{\text{ред}}}(J_{\text{КП}} + J_{\text{бш}})$ — момент инерции системы «ротор

АТД — редуктор — колесная пара», приведенный к ротору АТД.

С учетом параметров механической части электровоза ЭП10 для номинального значения момента АТД НТА-1200, равного $M_{\text{эм н}} = 8860 \text{ Н}\cdot\text{м}$, получаем угловое ускорение ротора $\varepsilon = 73,11 \text{ рад/с}^2$.

Следовательно, САР асинхронного тягового привода должна проектироваться с учетом возможного изменения частоты вращения ротора АТД со скоростью до 100 рад/с (16 Гц/с). Поэтому время переходного процесса регулирования момента было априорно принято равным 30 мс . В этом случае при управлении АТД по напряжению некомпенсированная постоянная времени контуров регулирования составляющих тока статора должна быть порядка 2 мс , что обеспечивает быстроедействие, необходимое для регулирования потокосцепления, и позволяет снизить до приемлемого уровня влияние пульсаций тока статора в сигнале обратной связи.

С учетом принятой постоянной времени регулирования тока и параметров НТА-1200 регуляторы составляющих тока статора по осям d и q имеют следующие передаточные функции:

$$W_{\text{РТ}}(s) = \frac{0,002417s + 0,035614}{0,002s},$$

здесь частота модуляции инвертора была принята равной 1500 Гц .

Регулятор потокосцепления ротора в случае управления по напряжению имеет передаточную функцию:

$$W_{\text{РП}}(s) = \frac{1,3611s + 1}{0,0001771s}.$$

Для обеспечения заданной длительности переходного процесса некомпенсированная постоянная времени контура регулирования момента должна быть взята в 2 раза больше, чем для подчиненного контура регулирования составляющей тока статора ($T_{эм} = 0,004$ с). Кроме того, это позволяет устранить перерегулирование момента. Такое значение постоянной времени регулирования момента хорошо согласуется с полученным в п. 4.2 значением из условия обеспечения требуемой жесткости характеристик ЭМП.

Регулятор момента в соответствии с (4.65) имеет передаточную функцию

$$W_{PM}(s) = \frac{0,09068}{0,003188 \Psi_{r3} s}.$$

В правую часть этого выражения входит потокосцепление ротора. Отметим, что целесообразно брать не текущее, а заданное его значение, что позволяет избежать нежелательного перекрестного влияния контуров регулирования потокосцепления и момента. Если величину потокосцепления ротора считать постоянной (равной, например, номинальному значению), это приведет к снижению быстродействия контура регулирования момента при управлении с ослаблением поля.

Поскольку при работе АТД НТА-1200 с максимальной частотой вращения задание потокосцепления ротора может уменьшаться в 4 и более раз, соответствующее увеличение времени переходного процесса может оказаться недопустимым. Использование меньшего значения потокосцепления нежелательно, поскольку это может привести к появлению перерегулирования и потере устойчивости САР при работе АТД с потокосцеплением, близким к номинальному. Поэтому коэффициенты регулятора момента должны пересчитываться в управляющей программе для текущего значения заданного потокосцепления ротора.

В соответствии с изложенными выше принципами построения САР асинхронного тягового электропривода была создана компьютерная модель системы «двухуровневый АИН — АТД», с помощью которой был проведен ряд численных экспериментов для оценки работы САР.

На рис. 4.31 приведены результаты моделирования процессов для САР с регулированием по напряжению. При этом были ис-

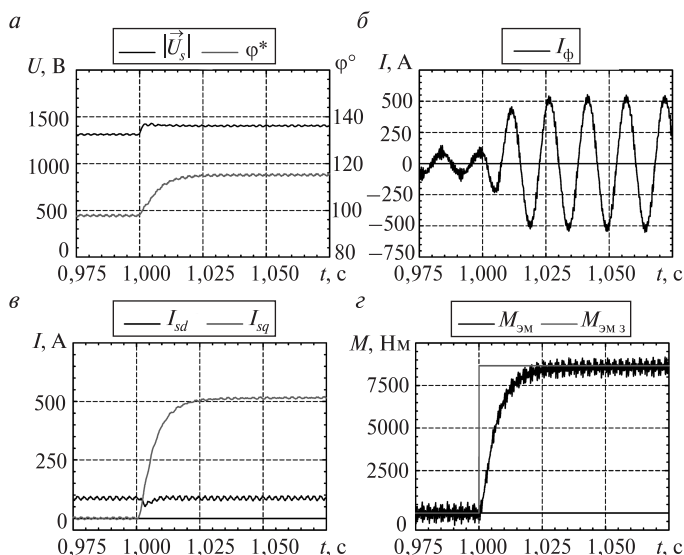


Рис. 4.31. Результаты математического моделирования процессов в АТЭП с САР, реализующей принципы векторного управления с регулированием по напряжению (частота модуляции 1500 Гц): *а* — амплитуда и положение вектора напряжения статора; *б* — ток фазы АТД; *в* — составляющие тока статора по осям d и q ; *г* — электромагнитный момент на валу АТД

пользованы параметры регуляторов, приведенные выше. Напряжение на выходе АИН формируется с помощью пространственно-векторной ШИМ (частота модуляции 1500 Гц). Сигналы обратной связи по току фильтруются с помощью цифровых фильтров второго порядка с частотой среза 600 Гц.

Ротор АТД вращается с частотой 65 Гц. Поскольку при работе АТД с частотой вращения, близкой к номинальной, запас АИН по напряжению минимален, в первую секунду задание потокоцепления увеличивается от нуля до номинального значения по экспоненциальному закону с постоянной времени 0,1 с. Это также позволяет снизить величину токов фаз АТД до значения, допустимого с точки зрения СПП АИН.

Через одну секунду с начала расчета задание момента ступенью увеличивается от нуля до номинального значения.

Как видно из рис. 4.31, регулирование электромагнитного момента на валу АТД происходит без перерегулирования, время пе-

выходного процесса соответствует заданному. Выбор частоты модуляции АИН, параметров регуляторов и цифровых фильтров позволяет снизить влияние пульсаций тока в сигналах обратной связи регуляторов до приемлемого значения. Величина пульсаций напряжения, которое с выхода САР поступает в систему управления АИН нижнего уровня, не оказывает заметного влияния на форму выходного напряжения АИН. Анализ результатов моделирования показал, что коэффициенты регуляторов могут рассчитываться по номинальным значениям параметров АТД. Насыщение его магнитной системы, приводящее к изменению индуктивности намагничивания, при выбранных показателях быстродействия системы влияет на динамику процессов незначительно.

При создании САР с векторным управлением необходимо учитывать, что АТД обладает значительной электромагнитной инерцией. Постоянная времени ротора, определяющая скорость изменения потокосцепления при изменении тока, может достигать единиц секунд. В то же время, для реализации указанных выше принципов регулирования потокосцепление необходимо регулировать на три порядка быстрее. Это требует от внутреннего контура регулирования тока реализации больших токов статора, что невозможно из-за ограничений по выходному напряжению инвертора и току СПП (как правило, при проектировании тягового преобразователя предусмотрено полуторакратное превышение номинального тока).

Регулирование АТД с использованием принципов векторного управления требует поддержания на заданном уровне (стабилизации) потокосцепления ротора. Поэтому одной из главных задач канала регулирования потокосцепления ротора является компенсация возмущений со стороны канала регулирования момента, чем и должно определяться его быстродействие. Такая настройка контура регулирования потокосцепления может приводить к появлению недопустимо больших токов статора при значительном рассогласовании, подаваемом на вход регулятора потокосцепления. Поэтому на входе канала регулирования потокосцепления целесообразно использовать аperiодическое звено первого или второго порядка, которое позволит плавно изменять задание потокосцепления, подаваемое на вход соответствующего канала регулирования. Постоянная времени этого звена определяется, с одной

стороны, требуемым быстродействием изменения задания потоко-сцепления при изменении частоты вращения АТД в области работы с ослаблением поля и, с другой стороны, допустимым, с точки зрения инвертора током статора. Предварительный анализ показал, что эта постоянная времени должна быть на порядок меньше постоянной времени ротора АТД. Для АТД НТА-1200, где $T_r = 1,36$ с, было выбрано значение 0,1 с, что позволяет избежать превышения током статора его полуторакратного номинального значения.

При высоких частотах модуляции происходит значительное выделение тепла, которое приходится отводить от силовых полупроводниковых модулей. Поэтому, с точки зрения снижения потерь в СПП инвертора, частота модуляции должна быть по возможности меньшей. Выполненный анализ работы САР показал, что система сохраняет работоспособность при снижении частоты модуляции до 800—1000 Гц.

На рис. 4.32 приведены результаты математического моделирования процессов в системе «двухуровневый АИН—АТД» при тех же условиях, что и для описанного выше случая (см. рис. 4.31), но с частотой модуляции 1000 Гц. В соответствии с ней были скорректированы параметры регуляторов тока. Система сохраняет устойчивость и показатели быстродействия, несмотря на возросшие пульсации тока и напряжения, подаваемого на вход системы управления АИН нижнего уровня.

За счет снижения быстродействия контуров регулирования составляющих тока статора на 30—40 % и, как следствие, некоторого ухудшения качества регулирования момента из-за появления перерегулирования, можно снизить частоту модуляции АИН при управлении АТД НТА-1200 до 450 Гц, что является ее нижним пределом при заданных показателях быстродействия системы в целом. При этом для фильтрации сигналов обратной связи по току требуется использование фильтров Баттерворта высоких порядков, так как фазовые искажения, вносимые более простыми фильтрами, приводят к неустойчивости САР. Реализация фильтров Баттерворта пятого-восьмого порядков усложняет управляющую программу и требует повышения требований к разрядности и быстродействию управляющей ЭВМ.

Таким образом, определен оптимальный диапазон частот модуляции АИН: 800—1000 Гц, с возможностью увеличения до 1500 Гц.

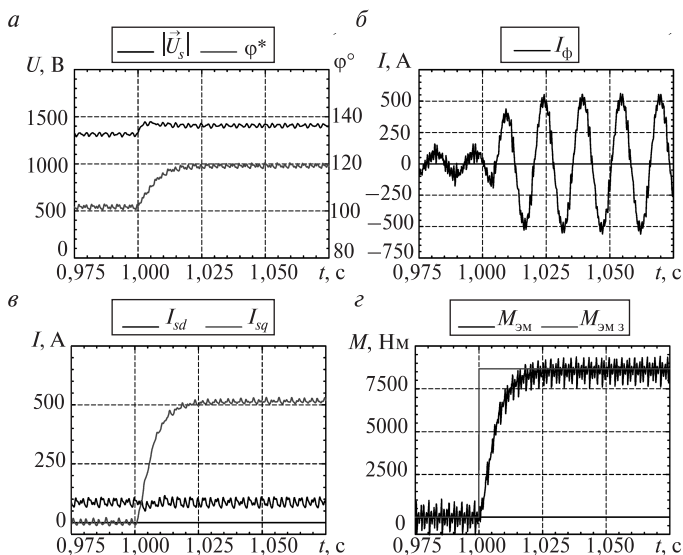


Рис. 4.32. Результаты математического моделирования процессов в АТЭП с САР, реализующей принципы векторного управления с регулированием по напряжению (частота модуляции 1000 Гц): *а* — амплитуда и положение вектора напряжения статора; *б* — ток фазы АТД; *в* — составляющие тока статора по осям d и q ; *г* — электромагнитный момент на валу АТД

При построении САР с использованием регулирования по току процессы в системе протекают аналогично. На рис. 4.33 приведены результаты математического моделирования процессов при использовании управления по току с прямой ориентацией по полю ротора для условий, описанных выше. Ширина «токового коридора» была принята равной ± 30 А, что позволяет получить такие же пульсации фазных токов и момента АТД, как и для случая управления по напряжению с частотой модуляции 1500 Гц. Использование управления по току с косвенной ориентацией по полю ротора дает аналогичные результаты и поэтому не приводится.

Сравнение результатов, приведенных на рис. 4.31 и 4.33 показывает, что при управлении по напряжению в начале переходного процесса после изменения задания момента имеется провал составляющей тока по оси d , что объясняется наличием в структуре канала регулирования потокосцепления контура регулирования тока.

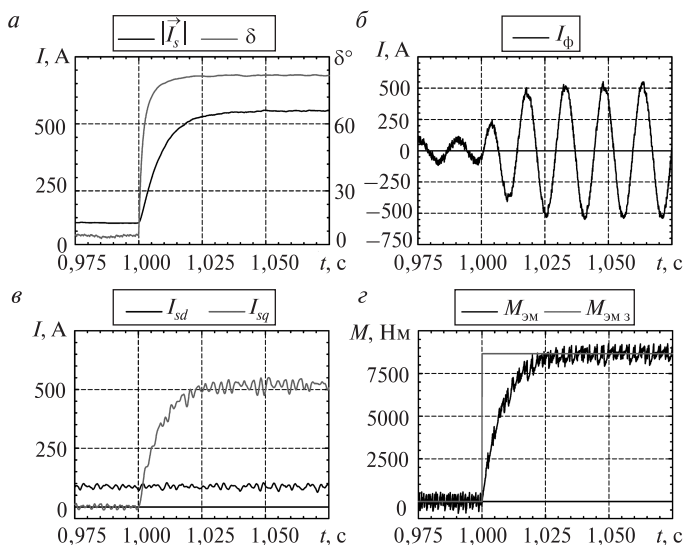


Рис. 4.33. Результаты математического моделирования процессов в АТЭП с САР, реализующей принципы векторного управления с регулированием по току: *a* — амплитуда и положение вектора напряжения статора; *б* — ток фазы АТД; *в* — составляющие тока статора по осям *d* и *q*; *г* — электромагнитный момент на валу АТД

В случае управления по току этот провал отсутствует, что позволяет повысить точность стабилизации потокоцепления и получить динамические свойства системы несколько лучшие, чем при регулировании по напряжению. Однако, работа АИН в режиме «токового коридора» приводит к увеличению количества переключений СПП на 30—40 % по сравнению с пространственно-векторной ШИМ при тех же пульсациях тока статора АТД.

Отметим большую чувствительность САР с управлением по току к пульсациям токов в сигналах обратной связи, что требует применения более сложных фильтров. Кроме того, при работе инвертора с выходной частотой, близкой к номинальной, из-за малого запаса по напряжению могут появляться провалы в кривой тока и, как следствие, в кривой момента, что снижает качество регулирования.

Существенным недостатком работы АИН в режиме «токового коридора» является меняющаяся частота переключений СПП. Поскольку ее увеличение приводит к росту потерь в силовых

полупроводниковых модулях и, как следствие, к повышению их температуры, снижается надежность работы инвертора. Возникает необходимость контролировать в управляющей программе частоту переключения СПП или температуру модулей и регулировать ширину «токового коридора» в зависимости от целого ряда факторов. Это приводит к усложнению системы охлаждения СПП и значительному росту вычислительных затрат для реализации управляющей программы. Поэтому при питании АТД от АИН целесообразно использование САР, реализующей управление по напряжению.

Как было отмечено выше, возмущением для САР является изменение частоты вращения ротора. На рис. 4.34 приведены результаты математического моделирования процессов в системе «двухуровневый АИН—АТД» при использовании САР с управлением по напряжению. Ротор АТД вращается с частотой 60 Гц, а начиная с момента времени $t = 1,5$ с частота вращения ротора растет со скоростью 15 Гц/с. Частота модуляции АИН равна 1500 Гц. Параметры регуляторов и прочие условия расчета взяты такими же, как в предыдущих случаях.

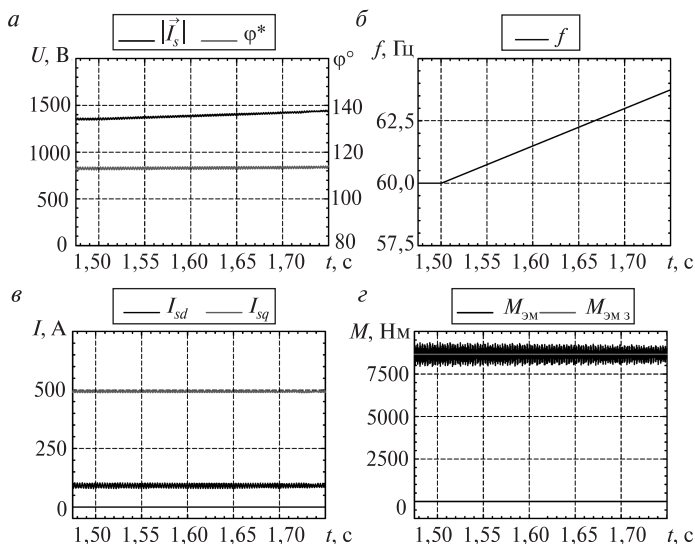


Рис. 4.34. Результаты математического моделирования процессов в АТЭП при изменении частоты вращения ротора АТД: а — амплитуда и положение вектора напряжения статора; б — частота вращения ротора АТД; в — составляющие тока статора по осям d и q ; г — электромагнитный момент на валу АТД

Анализ полученных результатов показывает, что регулирование осуществляется без колебаний, перерегулирования и динамической ошибки, что свидетельствует о правильном выборе параметров быстродействия САР.

Система остается устойчивой и сохраняет работоспособность при скорости изменения частоты вращения ротора АТД до 50—60 Гц/с, однако появляется перерегулирование около 5 % и динамическая ошибка регулирования как потокосцепления ротора, так и момента.

Аналогичные расчеты были выполнены и для случая использования трехуровневого АИН. Полученные результаты не показали существенных отличий от приведенных на рис. 4.31—4.34 и поэтому здесь не приводятся.

Поскольку при равной частоте модуляции спектральный состав фазных токов и момента АТД для трехуровневого АИН лучше, чем при использовании двухуровневого АИН, это открывает возможность применения более простых цифровых фильтров для фильтрации токов в сигналах обратной связи.

Окончательные выводы о настройке САР асинхронного тягового электропривода могут быть сделаны только на основе анализа процессов в ТЭП с использованием комплексной компьютерной модели электромеханической системы электровоза, так как частота вращения роторов АТД зависит от процессов в механической части локомотива.

4.4.4. Формирование заданий потокосцепления и момента АТД

Частота вращения ротора изменяется в широких пределах, что необходимо учитывать при создании САР. При скоростях, не превышающих номинальную, современные электровозы с АТД работают с ограничением по сцеплению. Поэтому в этой области тяговой характеристики реализуется закон регулирования с постоянством момента.

Заданный электромагнитный момент на валу АТД, как следует из (4.49), может быть получен при различных значениях потокосцепления ротора. Увеличение потокосцепления позволяет уменьшить ток статора, что снижает токовую нагрузку на СПП инвертора. Однако рост потокосцепления выше номинального значения приводит к насыщению магнитной системы АТД и значительному

увеличению магнитных потерь. Значительно увеличивается также составляющая тока статора по оси d , что может привести к росту тока статора вместо его снижения. Поэтому при частоте вращения ниже номинальной регулирование АДЦ целесообразно осуществлять с номинальным потокоцеплением.

В случае управления по закону $|\vec{\Psi}_r| = \text{const}$ величина напряжения статора согласно (4.53) увеличивается пропорционально частоте вращения ротора АДЦ. При частоте вращения выше номинальной ограничение по напряжению инвертора не позволяет в дальнейшем осуществлять регулирование при постоянном потокоцеплении и требуется применять ослабление поля. В этой области тяговой характеристики напряжение статора остается неизменным и равным своему предельному значению, которое определяется ограничением со стороны инвертора. Ток статора не должен превышать номинальный, что определяется допустимой токовой нагрузкой на СПП инвертора. Таким образом, при частоте вращения ротора выше номинальной регулирование АДЦ должно осуществляться при постоянных напряжении и токе статора, что соответствует реализации закона постоянства мощности, подводимой к статору. Такой закон позволяет наиболее полно использовать электротехническое оборудование электровоза и является оптимальным с точки зрения тяговых свойств электровоза.

С учетом того, что в установившемся режиме составляющая тока статора по оси d может быть выражена из (4.48):

$$I_{sd} = \frac{\Psi_{rd}}{L_m},$$

а составляющая тока статора по оси q равна

$$I_{sq} = \sqrt{|\vec{I}_s|^2 - I_{sd}^2} = \sqrt{|\vec{I}_s|^2 - \left(\frac{\Psi_{rd}}{L_m}\right)^2},$$

в соответствии с (4.53) напряжение статора АДЦ определяется соотношением

$$|\vec{U}_s| = \left(r_s \frac{\Psi_{rd}}{L_m} - \omega L'_s \sqrt{|\vec{I}_s|^2 - \left(\frac{\Psi_{rd}}{L_m}\right)^2} \right)^2 + \left(r_s \sqrt{|\vec{I}_s|^2 - \left(\frac{\Psi_{rd}}{L_m}\right)^2} - \omega L'_s \frac{\Psi_{rd}}{L_m} + k_r \Psi_{rd} \omega \right)^2. \quad (4.72)$$

Отсюда при заданных значениях напряжения и тока статора может быть найдено задание потоко-сцепления ротора.

Электромагнитный момент на валу АТД по известным потоко-сцеплению ротора и току статора может быть выражен из (4.49):

$$M_{\text{эм}} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r'} \Psi_{rd} \sqrt{|\vec{I}_s|^2 - \left(\frac{\Psi_{rd}}{L_m} \right)^2}.$$

Величина формируемого АИН выходного напряжения зависит от напряжения на его входе, вида модуляции, падений напряжения в СПП, фильтровом оборудовании и элементах монтажа и ряда других факторов.

Предельное значение амплитуды первой гармоники напряжения на выходе АИН может быть получено в одноимпульсном режиме и равно $2U_{\text{и}}/p$. При использовании пространственно-вектор-ной ШИМ максимальное значение амплитуды первой гармоники напряжения (без сверхмодуляции) равно $U_{\text{и}}/\sqrt{3}$.

С учетом того, что при увеличении коэффициента модуляции до 1,03—1,05 амплитуда выходного напряжения изменяется практически линейно, можно считать в качестве предельной величину напряжения статора на 2—4 % больше получаемой без сверхмодуляции. При этом остается запас по напряжению в 5—7 %, необходимый для работы САР.

Таким образом, при напряжении в контактной сети 3 кВ предельное значение амплитуды напряжения статора составляет 1780 В, при напряжении 2 кВ — 1190 В, при напряжении 4 кВ — 2370 В. Для этих значений напряжения и предельного тока статора, равного номинальному (530 А) были рассчитаны зависимости потоко-сцепления ротора и электромагнитного момента АТД от частоты вращения ротора. При этом найденная из (4.72) величина потоко-сцепления ограничивалась на уровне номинального значения.

На рис. 4.35 приведены зависимости потоко-сцепления, момента, тока статора и электромагнитной мощности на валу АТД, полученные при изменении частоты вращения ротора.

При пониженном напряжении в контактной сети переход к режиму работы с ослаблением поля происходит при частоте вращения ниже номинальной. Максимальная электромагнитная мощность на валу, реализуемая АТД, в этом режиме ниже номинальной и снижается пропорционально уменьшению напряжения.

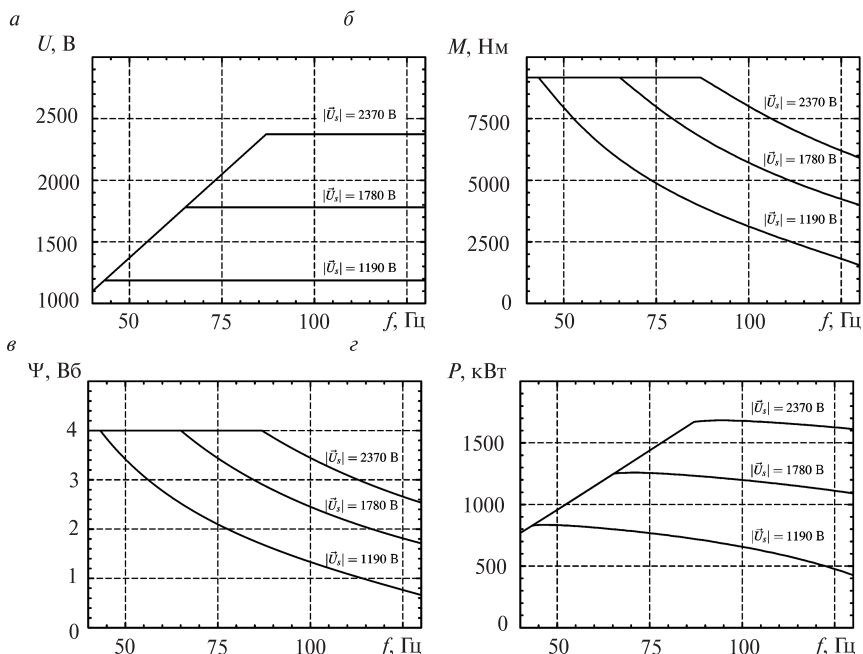


Рис. 4.35. Зависимости потокосцепления, момента, тока статора и электромагнитной мощности на валу АТД от частоты вращения ротора: *a* — амплитуда вектора напряжения статора; *б* — электромагнитный момент на валу; *в* — потокосцепление ротора; *г* — электромагнитная мощность на валу

Анализ полученных зависимостей показывает, что по мере роста частоты вращения и уменьшения потокосцепления ротора электромагнитная мощность на валу сначала возрастает за счет уменьшения реактивной составляющей тока статора, а затем снижается. Это происходит из-за падений напряжения на реактивных сопротивлениях рассеяния статора и ротора, увеличивающихся пропорционально частоте вращения ротора. Отметим, что по мере роста частоты вращения ротора влияние этого эффекта проявляется в большей степени. При частоте, вдвое превышающей номинальную, мощность становится на 13% меньше, чем в момент перехода на ослабление поля (при номинальном напряжении в контактной сети 3 кВ).

Увеличение тока статора позволяет поднять реализуемую АТД мощность в районе средних частот вращения ротора. Однако при дальнейшем увеличении частоты вращения потокосцепление ро-

тора, определяемое по (4.72), резко снижается и может дойти до нуля, делая регулирование невозможным. Это является следствием быстрого возрастания падений напряжения в реактивных сопротивлениях статора и ротора, которые определяются как ростом величины этих сопротивлений, так и большим током. Чтобы избежать появления этого эффекта, необходимо задание потокосцепления определять для номинального тока статора, а задание момента — для увеличенного.

С учетом сказанного выше формирование сигналов задания САР по потокосцеплению и моменту может быть выполнено следующим образом. Задание потокосцепления ротора определяется в зависимости от напряжения на входе АИН и частоты вращения ротора для номинального тока статора, а задание момента не должно превышать значения, определяемого допустимым током статора. В этом случае задание потокосцепления ротора однозначно определяется частотой вращения ротора (с учетом ограничения по напряжению), что позволяет сохранить принципы его регулирования, принятые при синтезе САР.

Такой способ формирования заданных значений потокосцепления ротора и электромагнитного момента позволяет получить высокие тяговые и энергетические показатели ТЭП и обеспечить его работу во всем диапазоне регулирования.

Подводя итог, необходимо отметить, что наиболее целесообразным является иерархическое построение системы управления локомотива с АТП. На нижнем уровне иерархии находится система импульсно-фазового управления преобразователем частоты и числа фаз, в задачи которой входит определение моментов открытия и закрытия СПП преобразователя, позволяющая реализовать требуемое значение напряжения (тока) на выходе. На среднем уровне иерархии находится САР асинхронного тягового привода, которая осуществляет регулирование АТД в соответствии с одним из изложенных выше трех принципов. Верхний уровень занимает система управления локомотивом.

В настоящее время в качестве ПЧФ наибольшее распространение получил АИН, для управления которым необходимо использовать один из видов модуляции. С точки зрения обеспечения максимально возможного выходного напряжения и снижения потерь

в СПП наилучшие результаты дает пространственно-векторная ШИМ. Ее применение позволяет получить неискаженное выходное напряжение на 15 % большее, чем для синусоидальной ШИМ, и снизить на треть число переключений СПП.

Можно сделать вывод о том, что САР асинхронным тяговым приводом должна обеспечивать автоматическое поддержание потокосцепления ротора. С учетом этого могут быть созданы системы с прямой и косвенной ориентацией по полю ротора. При использовании АИН целесообразно использовать систему с прямой ориентацией и управлением по напряжению.

Анализ структуры каналов регулирования потокосцепления ротора и момента показал, что для них целесообразно использовать двухконтурную схему. При этом внутренним контуром для каждого из каналов САР является контур регулирования тока статора, а внешним — потокосцепления ротора и момента.

Синтез САР необходимо выполнять с учетом того, что АИН является дискретной системой. Частота модуляции выходного напряжения определяется требуемым быстродействием регулирования тока статора, которое, в свою очередь, зависит от быстродействия контура регулирования момента.

Постоянная времени регулирования момента определяется либо требованием обеспечения жесткости тяговой характеристики АТЭП как электромеханического преобразователя, либо из условия работы АТД без момента сопротивления на валу. Как правило, эти два подхода приводят к близким результатам.

Для АТД НТА-1200 с учетом параметров механической части электровоза ЭП10 получено значение постоянной времени регулирования момента 7—10 мс, соответственно контуры регулирования составляющих тока статора должны иметь постоянные времени порядка 2 мс.

Для обеспечения такого быстродействия частота модуляции АИН должна находиться в пределах 800—1500 Гц. За счет снижения быстродействия контуров регулирования составляющих тока статора на 30—40 % можно достичь нижнего (равного 450 Гц) порога частоты модуляции АИН при заданных показателях быстродействия системы в целом, однако при этом ухудшается качество регулирования момента.

4.5. Пример построения системы управления асинхронным тяговым приводом тепловоза

Объединенная структурная схема управления дизель-генераторной установкой и асинхронным тяговым приводом тепловоза 2ТЭ25А-001 показана на рис. 4.36. Она включает системы автоматического регулирования частоты вращения коленчатого вала дизеля (САРД), автоматического регулирования мощности тягового генератора (САРГ), векторного управления тяговым асинхронным электроприводом с поосным регулированием мощности и силы тяги (СУ АТД). Работа всех трех систем взаимосвязана между собой.

В состав САРД входят:

- регулятор частоты вращения коленчатого вала дизеля (РЧВ), физически реализованный в составе электронного блока;
- функциональный преобразователь (ФП1);
- блок электрически управляемых форсунок подачи топлива (Ф);
- датчик частоты вращения коленчатого вала дизеля (ДЧВД).

Ряд других элементов САРД (датчик положения распредвала, давления наддувочного воздуха, давления масла и пр.) на схеме не показан, поскольку данные элементы не имеют принципиального значения для работы объединенной структурной схемы.

В состав САРГ входят:

- регулятор свободной мощности дизель-генераторной установки (РСМ);
- функциональные преобразователи (ФП2, ФП3, ФП4);
- регулятор напряжения тягового генератора (РН);
- блоки ограничения тяговой (ОГР1) и тормозной (ОГР2) мощности;
- тиристорный выпрямитель с фазовым управлением (УВ), питаемый от вспомогательного генератора трехфазным напряжением;
- датчик напряжения (ДН).

Физически блоки ФП1—ФП4, РСМ, РН, ОГР1, ОГР2 реализованы на программном уровне в составе микропроцессорной системы управления тепловозом (МПСУ-Т).

В состав каждой из шести СУ АТД входят:

- регулятор активной мощности (РАМ) на входе автономного инвертора напряжения (АИН) соответствующего АТД;
- логическое устройство (ЛУ);
- задатчик режима работы тормозного ключа (РТК);

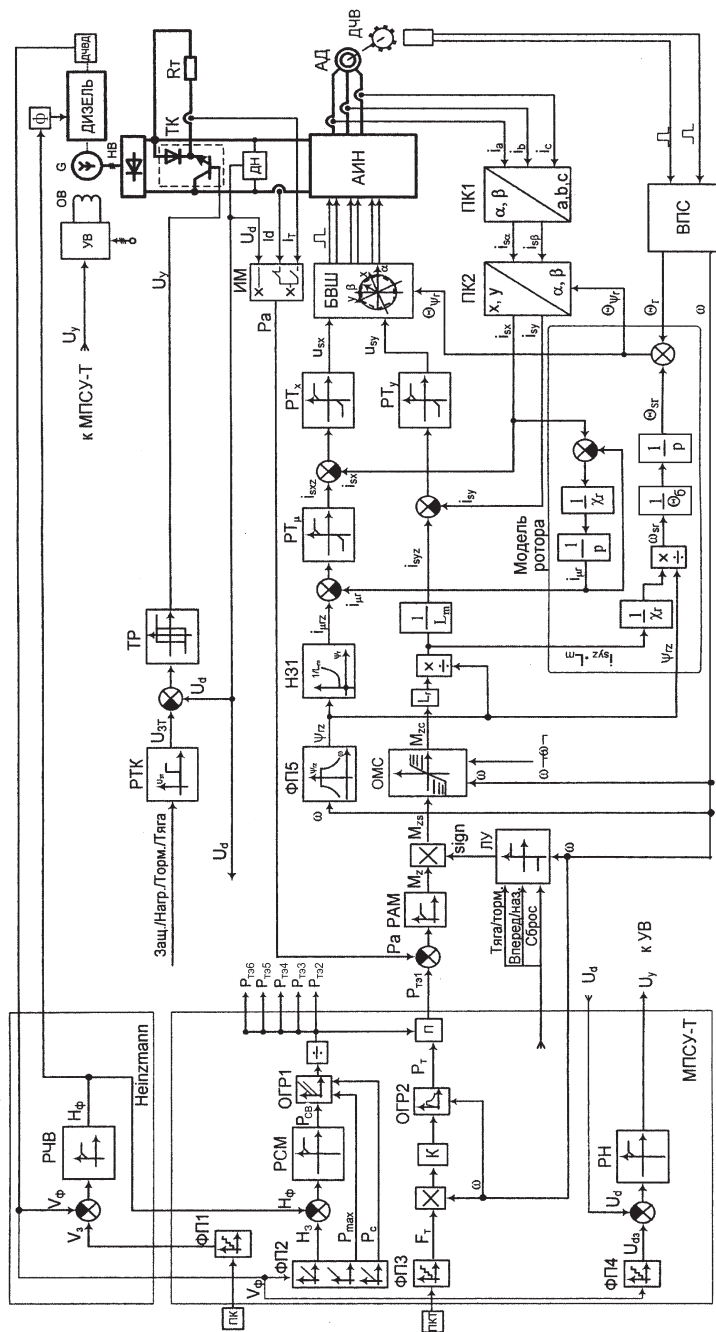


Рис. 4.36. Объединенная структурная схема управления дизель-генераторной установкой и асинхронным тяговым приводом тепловоза 2ТЭ25А-001

- тормозной регулятор (ТР);
- функциональный преобразователь потокосцепления ротора (ФП5);
- ограничитель заданного момента по условиям сцепления колес с рельсами и по максимальному значению (ОМС);
- нелинейное звено (НЗ1);
- регулятор тока намагничивания ротора (РТ_μ);
- регулятор тока по оси X (РТ_x);
- регулятор тока по оси Y (РТ_y);
- блок измерения активной мощности (ИМ);
- блок векторной ШИМ (БВШ);
- преобразователи координат (ПК1, ПК2);
- вычислитель положения и частоты вращения ротора АД (ВПС);
- двухканальный датчик частоты вращения ротора АД ДЧВ.

Принцип работы САРД состоит в следующем. В зависимости от выбранной позиции контроллера машиниста (ПК) из МПСУ-Т через ФП1 на положительный вход сумматора РЧВ поступает код заданной частоты вращения коленчатого вала дизеля (V_3) (физически это реализуется по последовательному каналу связи CAN). На отрицательный вход сумматора РЧВ поступает код фактической частоты вращения коленчатого вала дизеля с выхода импульсного датчика частоты вращения ДЧВД (V_ϕ). На выходе РЧВ формируется код фактической подачи топлива H_ϕ . Пропорционально данному коду электрически управляемые форсунки (Ф) дозируют величину подачи топлива в каждый цилиндр дизеля, поддерживая частоту вращения равной заданному значению. Мощность, развиваемая дизелем, пропорциональна подаче топлива H_ϕ (без учета изменения параметров топлива при изменении его температуры). Код фактического значения подачи топлива H_ϕ в виде обратной связи поступает в САРГ (по каналу CAN).

Полная мощность, развиваемая дизель-генераторной установкой тепловоза, используется для целей тяги (она называется свободной мощностью $P_{св}$) и для собственных нужд (охлаждения дизеля, тягового агрегата, тяговых двигателей, привода компрессора, питания кондиционера, зарядки аккумуляторной батареи и др.). Таким образом, свободная мощность $P_{св}$ в процессе работы тепловоза постоянно изменяется. Задачей САРГ является полное ис-

пользование всей свободной мощности дизеля для целей тяги (с учетом физических ограничений, накладываемых на тяговую характеристику по условиям сцепления и максимально допустимому моменту АТД). Принцип работы регулятора свободной мощности дизель-генератора следующий.

На положительный вход сумматора РСМ с ФП2 пропорционально фактической частоте вращения коленчатого вала дизеля поступает свой строго фиксированный код уставки заданной подачи топлива H_3 . На отрицательный вход сумматора РСМ с выхода РЧВ поступает код фактической подачи топлива H_Φ . На выходе РСМ формируется уставка свободной мощности дизель-генератора $P_{св}$, которая в блоке ОГР1 ограничивается максимальным значением сверху P_{max} и так называемым селективным значением мощности P_c снизу. После ее деления на количество приводных осей тепловоза (в нормальном режиме шесть) получаем уставку электрической мощности, которую должен реализовать тяговый асинхронный электропривод каждой оси $P_{mэi}$. При этом на каждой позиции контроллера напряжение тягового генератора с помощью РН поддерживается постоянным как на холостом ходу дизеля, так и в любой точке тяговой характеристики тепловоза, в отличие от тяговых электроприводов с коллекторными двигателями, где за счет изменения напряжения формируется тяговая характеристика.

Регулятор РН работает следующим образом. Через ФП4 пропорционально фактической частоте вращения коленчатого вала дизель-генератора на положительный вход сумматора РН поступает код уставки заданного напряжения U_{d3} . На отрицательный вход сумматора РН поступает код фактического значения напряжения U_d с выхода ДН, установленного в звене постоянного напряжения силового неуправляемого выпрямителя (НВ). На выходе РН формируется код управляющего напряжения U_y , который после преобразования его в фазу управляющих импульсов поступает на вход УВ с целью изменения тока возбуждения тягового генератора для стабилизации выходного напряжения НВ на уровне заданного значения U_{d3} .

Принцип совместной работы САРД и САРГ состоит в следующем. Предположим, что имеется некий установившийся режим работы дизель-генераторной установки в режиме тяги. При этом $V_3 = V_\Phi$, $H_3 = H_\Phi$. При включении, например, компрессора, на-

грузка на дизель возрастает и V_{ϕ} падает. При этом на входе РЧВ появляется положительное рассогласование, выходной сигнал H_{ϕ} возрастает, увеличивая подачу топлива, частота вращения коленчатого вала возрастает и становится равной V_3 . Увеличенное значение H_{ϕ} приводит к возникновению отрицательного рассогласования на входе РСМ и снижению выходного сигнала $P_{\text{св}}$, что приводит к разгрузке тягового электропривода и соответственно дизеля, увеличению V_{ϕ} , возникновению отрицательного рассогласования на входе РЧВ, снижению H_{ϕ} , что, в свою очередь, стабилизирует V_{ϕ} на уровне V_3 . В результате такого переходного процесса устанавливается новый режим работы дизель-генераторной установки, при котором снова $V_3 = V_{\phi}$, $H_3 = H_{\phi}$ и соответственно мощность дизель-генераторной установки осталась неизменной, а мощность, реализуемая на тягу $P_{\text{св}}$ снизилась ровно на величину мощности компрессора. Аналогично система работает и при сбросе нагрузки, например при отключении компрессора. Результатом переходного процесса будет увеличение уставки $P_{\text{св}}$.

СУ АТД обеспечивает работу тягового привода в режиме постоянства момента при пуске и разгоне с последующим переходом в режим работы с постоянной мощностью. Фактически из-за снижения сил сцепления колеса с рельсом в процессе разгона тяговый момент необходимо также несколько снижать. Векторная система управления АТД выполнена по принципу косвенной ориентации оси x по вектору потокосцепления ротора. Все переменные математической модели, на основе которой построена система, включая время, представлены в относительном виде для удобства цифровой процессорной реализации, а параметры — в виде удобных безразмерных коэффициентов.

Задающее воздействие в виде активной мощности $P_{\text{тэ}}$, которую должен реализовать электропривод каждой колесной пары, поступает на положительный вход сумматора ПИ-регулятора активной мощности (РАМ). На отрицательный вход сумматора с выхода блока измерения мощности ИМ поступает сигнал фактической активной мощности на входе АИН (P_a).

В режиме электрического торможения через переключатель П на вход системы подается уставка тормозной мощности $P_{\text{т}}$, которая определяется выбранной тормозной позицией от контроллера машиниста ПКТ. Через ФПЗ формируется заданная сила тормо-

жения F_T , которая преобразуется с помощью блока умножения, усилителя К и блока ограничения ОГР2 в величину заданной установки мощности торможения P_T . Одновременно на вход СУ АТД по каналу RS-422 от управляющей ЭВМ верхнего уровня (МП-СУ-Т) поступают сигналы управления «Тяга/Тормоз», «Вперед/Назад», «Сброс». На выходе РАМ формируется заданный момент АТД. Логическое устройство ЛУ в зависимости от заданных сигналов управления и знака действительной частоты вращения ротора АТД ω определяет знак заданного момента (тяговый или тормозной). Далее в системе имеется блок ограничения момента по максимально допустимому значению и по сцеплению (ОМС). При этом на первых трех тяговых позициях контроллера с целью обеспечения плавности трогания локомотива ограничение составляет соответственно 25, 50 и 75 % от максимально допустимого значения пускового момента. В канале задания момента имеется также задатчик интенсивности момента (на рисунке не показан), определяющий необходимый темп набора заданного момента.

В СУ АТД имеются контуры регулирования тока намагничивания ротора (с регулятором PT_u), тока по оси x (с регулятором PT_x), тока по оси y (с регулятором PT_y). Компенсация перекрестных связей между каналами x и y возложена на соответствующие регуляторы.

Блок векторной ШИМ (БВШ) формирует сигналы управления ключами инвертора по специально разработанному алгоритму двенадцатисекторной широтно-импульсной модуляции базисных векторов, который позволяет снизить эффект «мертвого времени» и повысить качество выходного напряжения АИН. Блок вычисления положения и скорости (ВПС) позволяет определять электрическое положение ротора и электрической частоты вращения, направление вращения ротора по сигналам импульсного датчика частоты вращения ДЧВ. В модели ротора в зависимости от величины заданного момента, заданного потокосцепления ротора и параметров АТД определяется, в том числе в динамике, требуемое скольжение АТД.

Цепь отбора энергии из звена постоянного напряжения управляется тормозным регулятором ТР, режим работы которого определяется блоком РТК. При этом в процессе торможения, срабатывания защиты и в режиме нагружения дизель-генерато-

ра тормозной ключ ТК открыт постоянно. При превышении напряжения в звене постоянного тока выше 1950 В ТК включается кратковременно для исключения перенапряжений. Тормозная мощность регулируется за счет работы РАМ с последующим воздействием на скольжение АТД при постоянно включенном ТК.

Для регулирования момента двигателя при изменении потока в системе управления учитывается нелинейный характер изменения индуктивности намагничивания (блок НЗ1), заложенной в виде массива, аппроксимирующего реальную кривую намагничивания. ФП5 представляет собой зависимость заданного потокосцепления ротора в зависимости от частоты вращения ротора. Данная зависимость может быть рассчитана исходя из различных требований к тяговому электроприводу. Для обеспечения максимально быстрого действия потокосцепление необходимо по возможности поддерживать на номинальном уровне в максимально широком скоростном диапазоне. Однако с целью оптимизации системы по общему КПД необходим другой закон изменения заданного потокосцепления. При расчете также необходимо обеспечить работу двигателя с напряжением, не превышающим 95 % от максимально возможного. В противном случае система может оказаться неустойчивой. Кривые, заложенные в нелинейные звенья, определяются применительно к конкретной электрической машине и тепловозу и уточняются в процессе испытаний.

Для перевода фазных токов из неподвижной системы координат (a, b, c) во вращающуюся (x, y) и напряжений $U_{x \text{ зад}}^*$, $U_{y \text{ зад}}^*$ из вращающейся системы (x, y) в неподвижную (a, b, c) система управления АТД имеет в своем составе координатные преобразователи ПК1, ПК2.

Глава 5. МЕХАНИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ЛОКОМОТИВОВ С АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ

Глава 5 посвящена рассмотрению вопросов, связанных с особенностями конструкции механической части локомотивов, оснащенных асинхронными тяговыми двигателями.

Рекомендуемая литература: [5, 9, 11, 13, 18, 20, 21, 22, 24].

5.1. Особенности конструкции механической части локомотивов с АТП

Высокая скорость и большая сила тяги локомотивов с АТП предъявляют особые требования к их механической части. Согласно «Типажу» на пассажирских и скоростных электровозах должны применяться двухступенчатое рессорное подвешивание кузова и тяговый привод движущих осей третьего класса (опорно-рамное подвешивание тяговых двигателей и редукторов). Допускается применение тягового привода второго класса (опорно-рамное подвешивание тяговых двигателей при опорно-осевом редукторе). На грузовых электровозах должны применяться двухосные тележки с опорно-осевым подвешиванием тяговых двигателей и моторно-осевыми подшипниками качения, обеспечивающими надежную работу до заводского ремонта. На грузовых тепловозах должны использоваться трехосные тележки также с опорно-осевым подвешиванием тяговых двигателей и моторно-осевыми подшипниками качения.

Динамические характеристики и показатели воздействия на путь вновь разрабатываемых локомотивов должны соответствовать нормативным документам. Рессорное подвешивание должно быть двухступенчатым с общим статическим прогибом не менее 130 мм для грузовых и не менее 150—170 мм для пассажирских локомотивов с отдельной системой демпфирования каждой ступени.

Для магистральных локомотивов, предназначенных для эксплуатации на горных участках железных дорог, по требованию заказчика возможно применение системы радиальной установки колесных пар. Магистральные локомотивы должны оборудоваться гребнесмазывателями.

Применение асинхронного тягового привода существенным образом влияет на основные показатели локомотивов. Сопоставление характеристик тяговых электродвигателей пассажирских электровозов ЭП1 и ЭП10, имеющих одинаковую осевую формулу 2о-2о-2о, дано в табл. 5.1. Как следствие, возникает целый комплекс проблем, связанных с необходимостью создания экипажной части, способной в полной мере реализовать преимущества АТП.

Таблица 5.1

**Сопоставление характеристик тяговых электродвигателей
электровозов ЭП1 и ЭП10**

Тип электровозов	ЭП1	ЭП10
Тип тягового электродвигателя	коллекторный, НБ-520В	асинхронный, НТА-1200
Мощность ТЭД в часовом режиме, кВт	800	1200
То же, в продолжительном режиме, кВт	750	1170
Момент на валу ТЭД в часовом режиме, кН·м	6,822	8,853
То же, в продолжительном режиме, кН·м	7,418	8,629
Частота вращения в часовом режиме, об/мин	1030	1295
То же, в продолжительном режиме, об/мин	1050	1295
Максимальная частота вращения, об/мин	2100	2680
КПД в часовом режиме, %	94,5	95,7
То же, в продолжительном режиме, %	94,6	95,8

Как известно, мощность асинхронных тяговых двигателей, которыми оснащен электровоз ЭП10, в 1,5 раза превышает мощность коллекторных тяговых двигателей электровоза ЭП1. Значительное увеличение момента на валу тягового двигателя (30 %) предъявляет повышенные требования к прочности и ресурсу силовой механической передачи (тяговой муфты, зубчатой передачи, подшипников тягового двигателя и редуктора и т.п.). После того как в контакте «колесо—рельс» реализовано тяговое усилие, оно передается через буксовые поводки на раму тележки, а затем на кузов. Соответствующие узлы должны иметь увеличенный запас прочности — по сравнению с узлами, применявшимися на локомотивах с коллекторными тяговыми двигателями.

Возросшая угловая скорость вала АТД требует установки новых подшипников, тщательной динамической балансировки и т.п.

Следствием применения асинхронного тягового привода является увеличение веса и объема электрооборудования, размещаемого в кузове (см. рис. 1.27). Как видно из табл. 5.2, для двухсистемного электровоза ЭП10 увеличение веса электрооборудования, находящегося в кузове, составляет более 25 %. В такой ситуации должны применяться кузова несущей конструкции, обеспечивающие увеличение объема для установки оборудования при одновременном снижении массы несущих металлоконструкций без ущерба для нормативных показателей прочности.

С другой стороны, уменьшение веса асинхронных тяговых двигателей по сравнению с коллекторными приводит к значительному перераспределению веса между кузовом и тележками — вес кузова с оборудованием возрастает, а вес тележек уменьшается. В результате центр масс оказывается расположенным на большей высоте, что невыгодно с точки зрения динамики.

Таблица 5.2

Распределение масс элементов конструкции электровозов ЭП1 и ЭП10

Тип электровозов	ЭП1	ЭП10
Полная масса электровоза, т	132	135
Масса кузова с оборудованием, т:	68,055	78,66
в том числе:		
масса несущих металлоконструкций	20,3	19,14
вспомогательные конструкции	7,75	8,39
масса оборудования	37	47
Масса трех тележек и связей, т	63,945	56,34
То же, одной рамы тележки, т	2,950	2,690
То же, одного тягового двигателя, т	3,500	2,600
То же, одной колесной пары (с буксами), т	4,090	3,950
Осевая нагрузка, кН	220	225

Крутящий момент асинхронного тягового двигателя имеет большую амплитуду и сложный спектральный состав, поэтому при проектировании тележек необходимо предусмотреть меры для того, чтобы избежать совпадения собственных частот экипажной части и частот пульсаций момента — это вызвало бы резонансные явления в элементах тягового привода и могло бы привести к их разрушению. Как показал опыт эксплуатации, возможно также ослабление затяжки болтовых соединений.

При увеличении скорости движения пассажирских электровозов до 200 км/ч необходимо обеспечить нормативные показатели воздействия на путь и показатели динамики экипажа, а также оптимальные характеристики рессорного подвешивания и систем демпфирования. Необходимо также предусмотреть эффективную тормозную систему, обеспечивающую торможение без юза.

Для новых электровозов ОАО «РЖД» предусматривает следующий регламент технического обслуживания:

- текущий ремонт (ТР) — через 100 тыс. км пробега;
- средний ремонт (СР) — через 1 млн км;
- капитальный ремонт (КР) — через 3 млн км.

Поэтому тяговая зубчатая передача, муфты, подшипники редуктора, тягового двигателя и колесной пары должны обеспечивать требуемую долговечность при увеличенных — по сравнению с коллекторным приводом — нагрузках. Для грузовых электровозов эта проблема осложняется тем, что они, по требованию ОАО «РЖД», должны проектироваться с нагрузкой от колесной пары на рельсы 25 тс (вместо 24 тс у ныне выпускаемых электровозов с коллекторным приводом). Это увеличивает весовую нагрузку на несущие конструкции механической части.

Для тепловозов с АТП увеличение мощности и силы тяги не является столь актуальной проблемой, как для электровозов, поскольку мощность тепловоза определяется в первую очередь мощностью дизеля. АТП в конструкции тепловозов применяется в основном для снижения затрат в эксплуатации, так как асинхронный тяговый двигатель требует гораздо меньших затрат на обслуживание и ремонт, чем коллекторный тяговый двигатель. Но проблемы снижения веса механической части в связи с увеличением веса комплекта электрооборудования и требование несовпадения собственных частот несущих конструкций с частотой пульсаций электромагнитного момента АТД для тепловозов с асинхронным приводом также актуальны, как и для электровозов.

Ниже будут последовательно рассмотрены обозначенные проблемы и пути их решения.

5.2. Несущие кузова

Кузов является наиболее металлоемкой конструкцией локомотива. На долю кузова приходится 14—20 % общей массы локомо-

тива, поэтому для компенсации возросшего веса электрооборудования, связанного с применением асинхронного тягового привода (см. табл. 5.2), необходимо предусматривать мероприятия по снижению веса кузова. Это позволит обеспечить нормативные показатели по нагрузке от колесной пары на рельсы, по показателям динамики и воздействия на путь.

Поэтому для локомотивов с асинхронным тяговым приводом необходимо применять кузова несущей конструкции, поскольку они имеют меньшую металлоемкость. Несущими называются кузова, у которых нагрузку воспринимают все элементы кузова (рама, боковые стенки, элементы крыши).

Несущие кузова по своей конструкции подразделяются на два типа:

- с ферменно-раскосными стенками, где основным несущим элементом боковой стенки является раскосная ферма из гнутых тонкостенных элементов;

- безраскосного типа, где основным несущим элементом стенки является обшивка, выполненная из стального листа толщиной 2—2,5 мм. Обшивка стенки кузова безраскосного типа подкреплена каркасом в виде решетки, выполненным из гнутых тонкостенных элементов. Второй тип кузовов имеет наименьшую металлоемкость.

Несущие кузова с ферменно-раскосными стенками применяются в конструкции тепловозов ТЭП60, ТЭП70 (рис. 5.1), ТЭП75, а с безраскосными стенками — в конструкции тепловоза ТЭ109 (рис. 5.2), электровозов Ср1 и ЭП10 (рис. 5.3).

К прочности кузовов предъявляются специальные требования: они должны быть рассчитаны на прочность по допускаемым напряжениям и на сопротивление усталости.

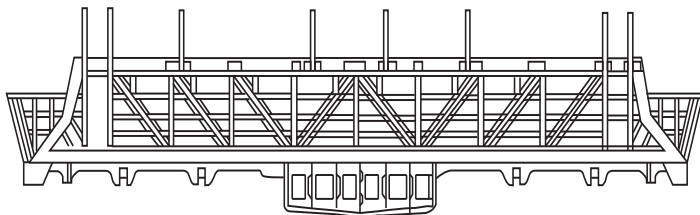


Рис. 5.1. Кузов тепловоза ТЭП70

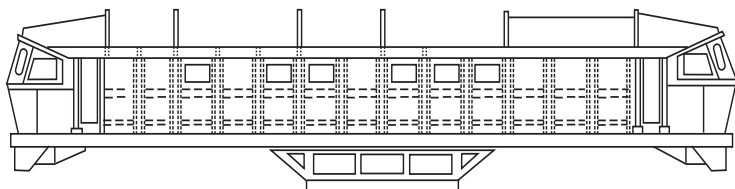


Рис. 5.2. Кузов тепловоза ТЭ109



Рис. 5.3. Общий вид электровоза ЭП10
(несущий кузов с безраскосными
стенками)

Оценка прочности по допускаемым напряжениям осуществляется при наиболее невыгодном возможном сочетании одновременно действующих нормативных сил для приведенных ниже расчетных режимов:

- режим I — условный режим безопасности, учитывающий возможность возникновения значительных продольных сил, обусловленных маневровой работой, транспортировкой и аварийными соударениями;

- режим II — эксплуатационный, учитывает силы, действующие на кузов при разгоне поезда до конструкционной скорости, движении на выбеге или торможении с этой скорости в криволинейном участке пути.

На первом этапе проектирования кузова поперечные сечения продольных несущих элементов выбираются из условия обеспечения прочности в режиме I. Подбор поперечного сечения продольных элементов кузова осуществляется с учетом вписывания в габарит и геометрического вписывания тележек под кузовом. Так, например боковины рамы кузова электровоза ЭП10 подняты выше уровня верхнего листа рамы тележек для обеспечения геометрического вписывания тележек под кузовом при прохождении кривых малого радиуса, а электровоз ЭП1 имеет прямые боковины, так как по условию вписывания в габарит он имеет более широ-

кую раму кузова, которая позволяет размещаться тележкам под кузовом в повернутом состоянии при прохождении таких же кривых малого радиуса.

Уменьшение высоты боковины рамы кузова, с одной стороны, снижает ее вес, а с другой — увеличивает в ней напряжения от действующих сил, поэтому на стадии проектирования необходимо с высокой степенью точности определить напряжения в элементах конструкции кузова. Для этого применяется метод конечных элементов (МКЭ). Для оценки прочности кузова в режиме I, эквивалентные напряжения, полученные расчетным путем, сравнивают с допускаемыми.

Условие достаточной прочности можно выразить соотношением:

$$\sigma_э \leq [\sigma],$$

где $\sigma_э$ — эквивалентные напряжения;

$[\sigma]$ — допускаемые напряжения.

Допускаемые напряжения в режиме нагружения I для сталей 09Г2, 09Г2С, Ст3, которые обычно применяются для несущих конструкций кузова, должны быть не более $0,9\sigma_T$, где σ_T — предел текучести стали.

Современные расчетные программы, основанные на МКЭ, позволяют учитывать геометрические и технологические особенности конструкции с высокой степенью детализации, что дает хорошую сходимость результатов расчета и испытаний и позволяет оптимизировать конструкцию по весовым показателям. С этой целью для участков кузова с различными уровнями напряжений применяются поперечные сечения, имеющие разные геометрические характеристики — толщину, высоту, ширину элементов.

На рис. 5.4 изображена расчетная схема кузова электровоза применительно к режиму нагружения I. Расчетная схема включает схему приложения действующих сил и схему граничных условий (схему закрепления) конечно-элементной модели.

Предлагаемая схема закрепления позволяет конечно-элементной модели деформироваться так же, как деформируется кузов в реальной конструкции, что дает высокую сходимость результатов расчета и натурных испытаний.

На начальной стадии проектирования кузова, когда еще окончательно не определена компоновка оборудования в нем, допус-

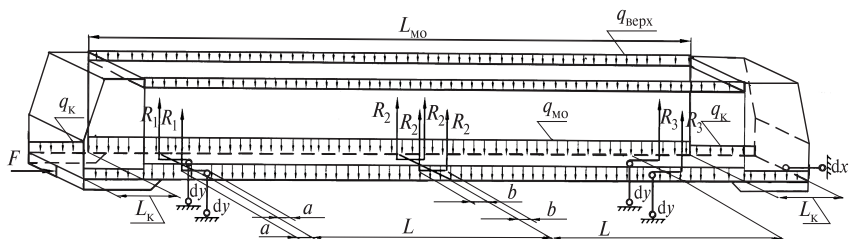


Рис. 5.4. Расчетная схема кузова электровоза в режиме I

кается приложение весовой нагрузки в виде равномерно распределенной нагрузки, приложенной в местах расположения оборудования.

На рис. 5.4 и на рис. 5.7, 5.8 (см. ниже) приняты следующие обозначения: $q_{\text{к}}$, $q_{\text{мо}}$, $q_{\text{верх}}$ — распределенные нагрузки от веса оборудования; $q_{\text{мо}}^{\text{и}}$, $q_{\text{к}}^{\text{и}}$, $q_{\text{верх}}^{\text{и}}$ — распределенные инерционные нагрузки; $L_{\text{к}}$ — длина кабины; $L_{\text{мо}}$ — длина машинного отделения; L — полубаза кузова; a — расстояние между опорами крайней тележки; b — расстояние между опорами средней тележки; dx — ограничение перемещений вдоль оси X ; dy — ограничение перемещений вдоль оси Y ; dz — ограничение перемещений вдоль оси Z ; R_1 , R_2 , R_3 — реакции опор кузова; $F_{\text{т}}$ — сила в наклонной тяге от тележки к кузову; W — ветровая нагрузка; F — продольная сила.

Значения расчетной продольной силы F приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Расчетные продольные силы, кН

Тип локомотива	Режим I	Режим II
Пассажирский	2000 (2500)	550
Грузовой	2500 (3000)	700

Примечание. В скобках приведены значения, которые принимаются по специальным требованиям для локомотивов.

Результаты предварительного расчета кузова в режиме нагружения I показаны на рис. 5.5, а. По результатам этого расчета были выявлены области, имеющие недостаточный и избыточный запас прочности. Наибольшие напряжения возникают в зоне, где изменяется высота боковины рамы кузова, и в районе дверного проема, что видно на рис. 5.5, б.

Для обеспечения достаточной прочности эти места были усилены. Результаты расчета кузова с усилением показаны на рис. 5.6.

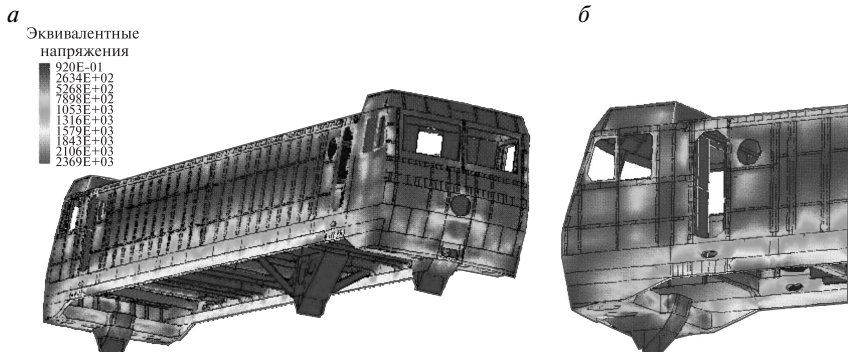


Рис. 5.5. Напряженно-деформированное состояние кузова ЭП10 в режиме нагружения I: *а* — результаты предварительного расчета; *б* — зоны наибольших напряжений

В окончательном варианте кузова эквивалентные напряжения в боковинах имеют примерно одинаковый уровень по всей длине.

После выполнения расчета кузова на прочность в режиме I выполняют расчет кузова в режиме нагружения II для двух расчетных схем:

- движение в прямом участке пути;
- движение в кривой.

Расчетная схема в режиме нагружения II при движении в прямом участке пути показана на рис. 5.7, а при движении в кривой — на рис. 5.8.

Для расчета прочности кузова в режиме нагружения II и на сопротивление усталости необходимо знать величины внешних нагрузок, действующих на кузов. К таким силам следует отнести реакции в опорах кузова R_1 , R_2 , R_3 , силы в наклонных тягах F_T , динамическую добавку от веса оборудования.

Эти величины можно определить на этапе проектных разрабо-

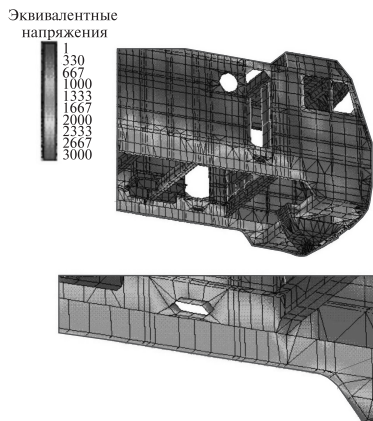


Рис. 5.6. Напряженно-деформированное состояние кузова ЭП10 в режиме нагружения I после усиления (вверху — общая картина, внизу — боковина кузова)

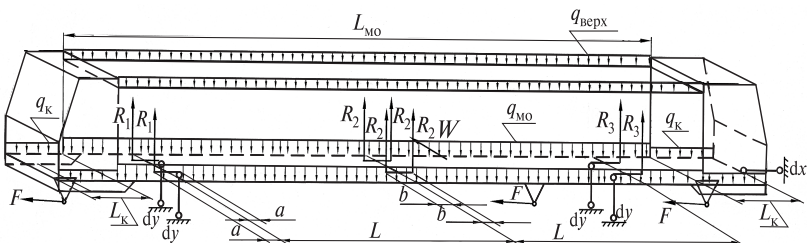


Рис. 5.7. Расчетная схема кузова электровоза в режиме II (движение в прямой)

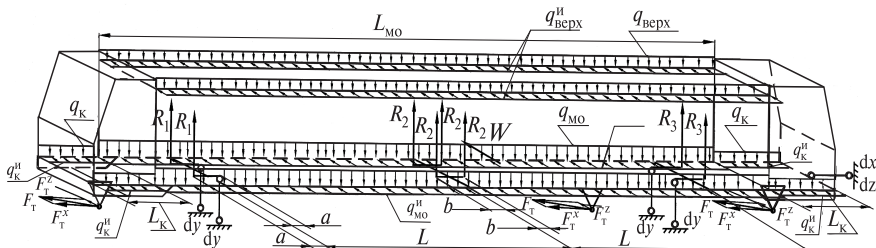


Рис. 5.8. Расчетная схема кузова электровоза в режиме II (движение в кривой)

ток, применяя современные пакеты компьютерного моделирования динамики механических систем, такие как программный комплекс «УМ-Локо» (www.umlabor.ru), подробно об этом будет сказано ниже в гл. 6.

В результате компьютерного моделирования движения локомотива по участку пути вычисляются значения сил в опорах кузова, наклонных тягах, гидродемпферах и т.д. (см. ниже рис. 6.7—6.9), которые можно затем использовать для выполнения прочностных расчетов кузова по приведенным на рис. 5.7, 5.8 схемам режима нагружения II и на сопротивление усталости.

После проверки прочности кузова выполняется обязательная проверка на сопротивление усталости. Коэффициент запаса сопротивления усталости должен быть не менее 2.

Расчетный коэффициент запаса сопротивлению усталости определяется по формуле:

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{k_{\sigma} \sigma_v + \psi \sigma_m} > [n],$$

где σ_{-1} — среднее значение предела выносливости стандартного образца при симметричном цикле нагружения;

k_{σ} — коэффициент, характеризующий понижение предела выносливости конструкции по отношению к пределу выносливости стандартного образца;

ψ — коэффициент, характеризующий влияние асимметрии цикла;

σ_v — амплитуда напряжений цикла;

σ_m — среднее напряжение цикла.

Значения σ_v и σ_m могут быть вычислены по результатам, полученным при моделировании движения экипажа в программе «УМ-Локо»:

$$\sigma_v = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}; \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}.$$

Коэффициент, характеризующий понижение предела выносливости k_{σ} , вычисляется в соответствии с действующей нормативной документацией.

Полученные значения σ_v , σ_m и k_{σ} подставляются в формулу для вычисления коэффициента запаса сопротивления усталости.

Если в ходе анализа усталостной прочности выявлены зоны, имеющие коэффициент запаса по усталости менее 2, то эти места должны быть усилены.

В результате выполненных работ удалось снизить вес кузова электровоза ЭП10 по сравнению с кузовом электровоза ЭП1 на 11,6 кН, несмотря на то, что вес оборудования, размещенного в кузове, увеличился на 117,65 кН. Сравнительные характеристики кузовов приведены в табл. 5.4. Как видно из этой таблицы, кузов электровоза ЭП10 имеет наилучшие удельные показатели, такие как отношение веса кузова к общему весу локомотива и отношение веса кузова к весу кузова с оборудованием.

Таблица 5.4

Сравнительные характеристики кузовов локомотивов

Параметр	ТЭП70	ТЭ109	ЭП1	ЭП10
Мощность, кВт	2940	2200	4800	7200
Вес служебный, кН (тс)	1266 (129,2)	1176 (120)	1320 (134,7)	1350 (137,8)
Осевая формула	3о-3о	3о-3о	2о-2о-2о	2о-2о-2о

Параметр	ТЭП70	ТЭ109	ЭП1	ЭП10
Осевая нагрузка, кН (тс)	211 (21,5)	196 (20)	220 (22,5)	225 (23)
Тип кузова	несущий, раскосный	несущий, безраскосный	с несущей рамой	несущий, безраскосный
Вес кузова с оборудованием, кН (тс)	745 (76)	691 (70,5)	680,55 (69,4)	786,6 (80,3)
Вес кузова, кН (тс)	183 (18,7)	174 (17,8)	203 (20,7)	191,4 (19,5)
Вес рамы кузова, кН (тс)	96 (9,8)	109 (11,1)	160 (16,3)	133,7 (13,6)
Длина кузова, м	19,850	19,580	21,280	21,280
Отношение веса кузова к его длине, кН/м (тс/м)	9,2 (0,94)	8,9 (0,91)	9,54 (0,97)	8,99 (0,92)
Отношение веса кузова к общему весу локомотива, %	14,4	14,8	15,4	14,2
Отношение веса кузова к весу кузова с оборудованием, %	24,6	25,1	29,8	24,3

5.3. Тележки локомотивов

Тележки предназначены для преобразования вращательного движения колесных пар в поступательное движение локомотива и передачи сил тяги и торможения от колесных пар на кузов локомотива, обеспечивая при этом нормативное взаимодействие локомотива и пути.

Тележки состоят из следующих основных частей: рама, колесные пары, буксы, буксовое рессорное подвешивание, тяговый привод, тормозная система, кузовное рессорное подвешивание, устройство для передачи силы тяги и торможения, система гребнесмазывания. Каждая из частей тележки выполняет свои функции.

Рама тележки предназначена для соединения в единую систему всех функциональных узлов тележки, восприятия и распределения при помощи рессорного подвешивания вертикальной и горизон-

тальной нагрузки от кузова на колесные пары, восприятия тяговых и тормозных сил. Рама является связующим, несущим элементом всех узлов тележки.

Колесная пара служит для восприятия веса локомотива, направления его движения по рельсовому пути, передачи силы тяги и тормозной силы, восприятия статических и динамических нагрузок, возникающих между рельсом и колесом, и преобразования вращающего момента тягового двигателя в поступательное движение электровоза.

Буксы предназначены для связи колесной пары с рамой тележки и передачи вертикальной нагрузки от подрессоренной массы электровоза на колесные пары, передачи силы тяги, торможения и боковых горизонтальных сил от колесной пары на раму тележки.

Буксовое рессорное подвешивание обеспечивает равномерное распределение вертикальных нагрузок от рам тележек по буксам колесных пар и уменьшение динамических сил, передаваемых колесными парами на наддресорное строение при прохождении неровностей пути.

Тяговый привод предназначен для передачи крутящего момента от ротора электродвигателя к колесной паре. Для увеличения крутящего момента на колесной паре применяется зубчатая передача, которая понижает частоту вращения и увеличивает крутящий момент и тем самым увеличивает силу тяги. Подробно конструкция тягового привода будет рассмотрена ниже в п. 5.4.

Тормозная система передает силы нажатия от тормозных цилиндров или привода стояночного тормоза к тормозным колодкам при торможении. В зоне контакта тормозной колодки или накладки с колесом образуется тормозная сила, которая замедляет инерционное движение локомотива.

Кузовное рессорное подвешивание служит для передачи весовой нагрузки от кузова на раму тележки и компенсации перемещений тележки относительно кузова во всех направлениях.

Система гребнесмазывания предназначена для подачи смазки на гребни бандажей колес для уменьшения их износа при движении по рельсовой колее.

Обеспечение нормативных показателей динамики и воздействия на путь достигается оптимальным выбором конструкции и параметров связей кузова с тележками, рессорного подвешивания,

систем демпфирования и связей колесной пары с рамой тележки. Требования к основным показателям динамики и воздействию на путь в соответствии с «Нормами расчета и оценки прочности несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм» приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Требования к динамическим качествам и по воздействию на путь

Наименование показателя	Нормативное значение
Коэффициент вертикальной динамики, не более: для первой ступени подвешивания то же, для второй	0,35 0,2
Коэффициент конструктивного запаса, не менее для первой ступени подвешивания то же, для второй	1,6 1,4
Рамные силы, не более	$0,4P_{\text{ст}}^*$
Рамные силы в стрелочных переводах, кН, не более	100
Боковая нагрузка колеса на рельс по условиям прочности раздельных рельсовых костыльных скреплений, кН, не более	100
Боковые силы в стрелочных переводах, кН, не более	120
Напряжения в кромках подошвы рельсов в прямых и кривых перегонных и станционных путей, в переводных кривых стрелочных переводах, МПа, не более	240

* $P_{\text{ст}}$ — статическая нагрузка от колесной пары на рельсы

Коэффициенты вертикальной динамики в обеих ступенях подвешивания определяются как отношение динамического прогиба $\delta_{\text{д}}$ в данной ступени подвешивания к его статическому значению $\delta_{\text{ст}}$

$$k_{\text{д}} = \frac{\delta_{\text{д}}}{\delta_{\text{ст}}}. \quad (5.1)$$

Коэффициент конструктивного запаса $k_{\text{кз}}$ определяется по формуле

$$k_{\text{кз}} = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{ст}}}, \quad (5.2)$$

где $P_{\text{ст}}$ — весовая нагрузка, приходящаяся на пружину;

P_p — расчетная нагрузка для проверки пружины на прочность; определяется из условия прогиба пружины на 3 мм большего, чем требуется для соприкосновения витков.

5.3.1. Конструкция тележек пассажирских электровозов с АТП

Особенности конструкции тележек пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом определяются высокой скоростью движения, большой силой тяги во всем диапазоне скоростей движения и меньшей, чем у грузовых электровозов, нагрузкой от колесной пары на рельсы.

Поэтому при проектировании пассажирских электровозов с АТП особое внимание необходимо уделять обеспечению нормативных показателей динамики и воздействия на путь при высоких скоростях движения, прочности и долговечности элементов тягового привода и несущих конструкций, вопросам перераспределения веса электровоза между кузовом и тележками, обеспечению эффективного торможения с высоких скоростей движения.

Рессорное подвешивание является важным элементом ходовой части, обеспечивающим уменьшение динамического взаимодействия локомотива и пути. Основными параметрами рессорного подвешивания являются общий статический прогиб $\delta_{\text{ст}}^0$, распределение его по ступеням подвешивания и параметры гидродемпферов. Общий расчетный статический прогиб для пассажирских электровозов с 2/3 запаса песка с конструкционной скоростью 160 км/ч рекомендуется принимать равным 170 мм, а для скорости 200 км/ч — 200 мм, причем 70 % статического прогиба рекомендуется размещать в кузовной ступени подвешивания.

Проблема обеспечения нормативных показателей динамики и воздействия на путь при значительно возросшей массе оборудования в кузове и высоких скоростях движения была успешно решена при проектировании пассажирского электровоза ЭП10 (см. табл. 1.11) за счет оптимального выбора характеристик связей кузова с тележками, буксовой ступени рессорного подвешивания, параметров демпфирования и мероприятий, направленных на снижение веса механического оборудования. Параметры упругих элементов приведены в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Параметры упругих элементов экипажной части электровозов ЭП1 и ЭП10

Тип электровозов	ЭП1	ЭП10
Вертикальная жесткость кузовного подвешивания (на тележку), кН/мм	3,640	2,180
То же, буксового подвешивания (на 1 ось), кН/мм	3,040	3,440
Продольная жесткость пружины «флексикойл» в опоре кузова на крайние тележки, кН/мм	—	0,545
То же, пружины люлечной подвески в опоре кузова на крайние тележки, Н/мм	0,570	—
Статический прогиб кузовного подвешивания, мм	77	120
То же, буксового подвешивания, мм	61	56

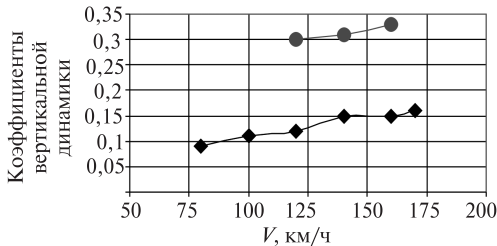


Рис. 5.9. Коэффициенты вертикальной динамики первой ступени рессорного подвешивания электровозов: ● — ЭП1; ◆ — ЭП10

На рис. 5.9 представлены коэффициенты вертикальной динамики k_d (5.1) первой ступени рессорного подвешивания для электровозов ЭП1 и ЭП10 в зависимости от скорости движения. Видно, что удалось уменьшить его значение практически в 2 раза. Нормативное значение k_d составляет 0,35 (см. табл. 5.5).

Унифицированная экипажная часть (осевая формула 2о-2о-2о) разработана для шестиосного пассажирского электровоза с асинхронным тяговым приводом, имеющего конструкционную скорость 160—180 км/ч, а в перспективе до 200 км/ч.

Двухосная тележка электровоза ЭП10 (рис. 5.10) выполнена с буксовым подвешиванием, состоящим из пружин и гидравлического гасителя колебаний, со статическим прогибом пружин буксовой ступени рессорного подвешивания 56 мм.

Колесные пары 3 тележки снабжены двухповодковыми буксами. Корпус буксы связан с рамой тележки с помощью буксовых поводков, имеющих уменьшенную по сравнению с аналогами поперечную жесткость. При движении колесная пара имеет попереч-

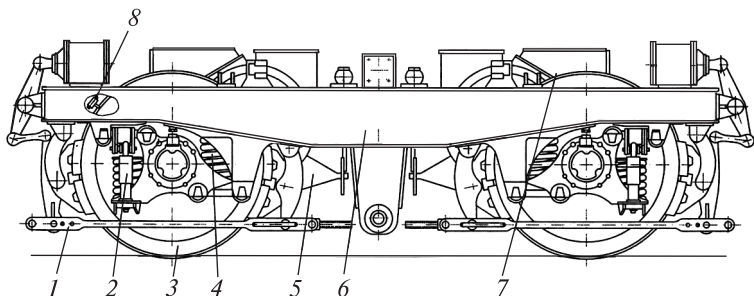


Рис. 5.10. Тележка электровоза ЭП10: 1 — тормозная система; 2 — гидродемпфер; 3 — колесная пара с буксами и редуктором; 4 — рессорная система буксовой ступени; 5 — корпус тягового редуктора; 6 — рама тележки; 7 — асинхронный тяговый двигатель; 8 — гребнесмазыватель

ное смещение относительно рамы тележки в пределах от 4—5 до 9 мм.

Рессорное подвешивание 4 выполнено в виде винтовых цилиндрических пружин; параллельно пружинам на каждой буксе устанавливается гидродемпфер 2 для демпфирования колебаний рамы тележки относительно колесных пар. Тормозная система 1 выполнена с двухсторонним нажатием безгребневых колодок на колесо, с приводом от одного тормозного цилиндра.

В конструкции тележки применен тяговый привод с опорно-рамным подвешиванием тяговых двигателей 7 и опорно-осевым тяговым редуктором 5 (подробнее см. ниже в п. 5.4.1).

Для снижения износа гребней колесных пар установлены гребнесмазыватели 8. На новых локомотивах применяются гребнесмазыватели типа АГС-9 производства ООО НПП «Фромир» (г. Ростов-на-Дону). Смазка подается при помощи форсунок на гребни набегающих колесных пар каждой тележки, причем предусмотрены два канала для независимой подачи смазки на левые и правые колеса. Блок управления имеет встроенные датчики, позволяющие автоматически определять моменты входа и выхода из кривых. Эффективность гребнесмазывания в криволинейных участках повышена за счет увеличения подачи смазки на гребень колеса, движущегося по внешней рельсовой нити. При интенсивном торможении подача смазки автоматически отключается. Предусмотрен контроль уровня смазки в баке с подачей предупредительного

сигнала при снижении уровня ниже минимально допустимого. В результате применения гребнесмазывателей ресурс бандажей возрастает в 3—5 раз, кроме того, сокращается расход энергии на тягу.

На рис. 5.11 показаны связи кузова с крайними тележками. Для передачи силы тяги и торможения от тележки к кузову применяется наклонная тяга 4, а в качестве опор кузова на крайние тележки — пружинные опоры «флексикойл» 1, работающие на сжатие и сдвиг.

Электровоз ЭП10 имеет раздельную по видам колебаний систему демпфирования кузовного подвешивания. Для демпфирования вертикальных колебаний кузова устанавливаются вертикальные гидродемпферы 3, разнесенные от середины тележки, что позво-

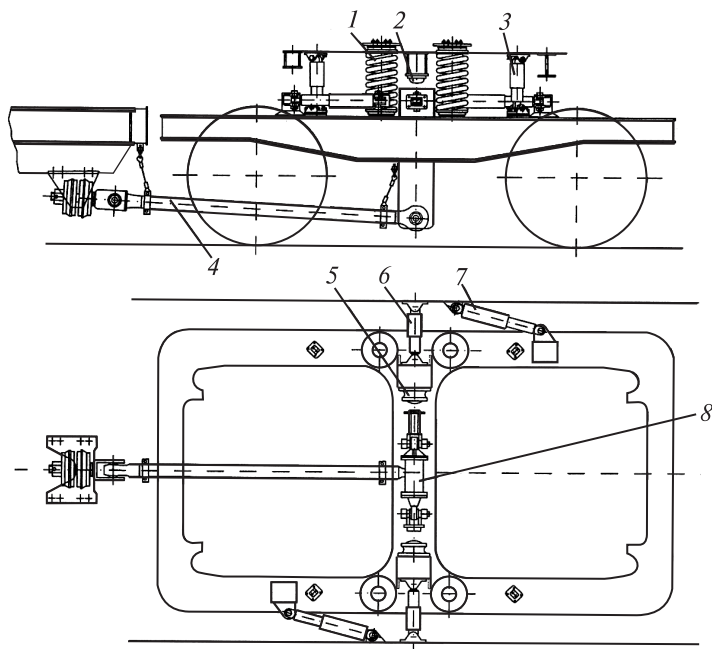


Рис. 5.11. Связи кузова с крайней тележкой: 1 — опора «флексикойл»; 2 — вертикальный ограничитель; 3 — вертикальный гидродемпфер; 4 — наклонная тяга; 5 — горизонтальный ограничитель; 6 — горизонтальный гидродемпфер; 7 — антивиальный гидродемпфер; 8 — противоотносное устройство

ляет демпфировать также колебания галопирования тележки. Горизонтальные гидродемпферы 6 демпфируют колебания бокового отбоя тележки относительно кузова, а антивилятельные гидродемпферы 7 — колебания виляния тележки при движении ее в рельсовой колее. Установка горизонтальных гидродемпферов на уровне нижнего несущего пояса кузова и рациональный подбор их параметров обеспечивают хорошую горизонтальную динамику экипажа.

Характеристика поперечной связи кузова с тележками формируется пружинами «флексикойл» и пружинным противоотносным устройством 8.

Опираение кузова на крайние тележки выполнено с использованием пружин «флексикойл», что позволило существенно снизить жесткость системы опирания кузова на тележки поперечному сдвигу кузова относительно тележек при движении в прямых и при угловом повороте в кривых (такие же опоры кузова применяются в современных конструкциях грузовых электровозов).

Противоповоротный момент тележки, который для люлечного подвешивания составляет $1200 \text{ кН}\cdot\text{м/рад}$, снижен до $335 \text{ кН}\cdot\text{м/рад}$, т.е. в 3,5 раза, что заметно улучшило динамические характеристики экипажа и снизило его воздействие на путь.

Кузов опирается на рамы крайних тележек через четыре опоры «флексикойл», установленные на верхнем листе боковины рамы тележки. Основной конструкции опоры «флексикойл» является винтовая цилиндрическая пружина 9, работающая на сжатие и сдвиг (рис. 5.12).

Пружина 9 опирается на раму тележки через полукольца 12, резино-металлическую шайбу 11, нижнюю опору 8. На верхний торец пружины опирается кузов через шайбы 6, верхнюю опору 5, резино-металлическую шайбу, цапфу 7. Цапфа крепится к

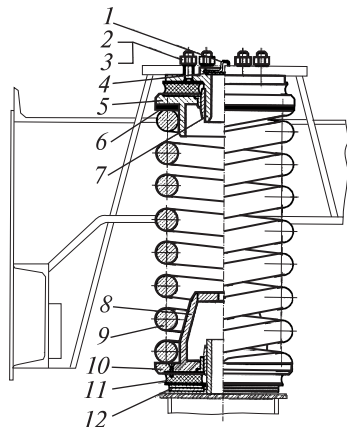


Рис. 5.12. Опора «флексикойл»: 1 — крышка; 2 — гайка; 3, 6, 11 — шайбы; 4 — кольцо; 5, 8 — верхняя и нижняя опоры; 7 — цапфа; 9 — пружина; 10 — винт; 12 — полукольцо

кронштейну на раме кузова гайками 2. Шайбы 6 применяются для того, чтобы выдерживать необходимую высоту пружины 9 с комплектами шайб под тарировочной нагрузкой. Полукольца 12 применяются для выполнения развески электровоза при необходимости. Резино-металлические шайбы 11 при деформации обеспечивают равномерное распределение нагрузки по длине опорного витка и снижение напряжений в опорных витках пружины.

При прохождении кривых участков пути малого радиуса кузов может смещаться относительно продольной оси средней тележки на 180 мм, поэтому опоры кузова на среднюю тележку выполнены аналогично конструкции опор кузова на среднюю тележку электровозов ВЛ65 и ЭП1 в виде упругих сжатых стержней, шарнирно опирающихся на раму тележки и кузов электровоза. Связи кузова со средней тележкой показаны на рис. 5.13, а конструкция опоры кузова средней тележки — на рис. 5.14.

На среднюю тележку кузов опирается через четыре опоры 1, сила тяги и торможения от тележки к кузову передается наклонной тягой 4. Для демпфирования вертикальных колебаний кузова относительно тележек установлены четыре гидродемпфера 3, а для демпфирования колебаний виляния тележки — четыре антивилятельных гидродемпфера 2.

Опора кузова на среднюю тележку (см. рис. 5.14) состоит из стакана 3 и стержня 4, между фланцами которых устанавливается

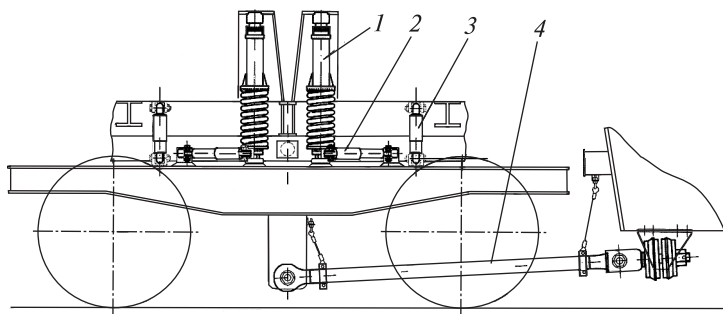


Рис. 5.13. Связи кузова со средней тележкой: 1 — опора кузова средней тележки; 2 — антивилятельный гидродемпфер; 3 — вертикальный гидродемпфер; 4 — наклонная тяга

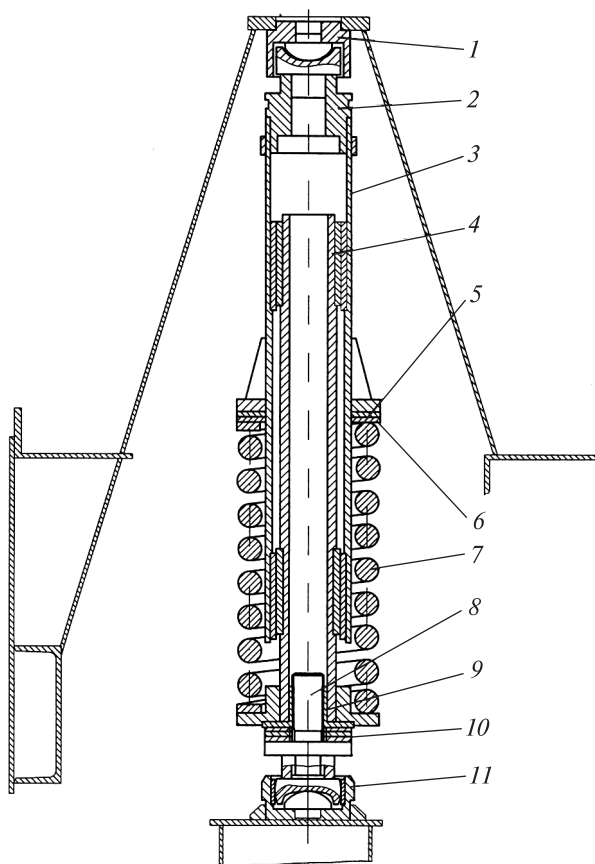


Рис. 5.14. Опора кузова средней тележки: 1, 2 — фланцы; 3, 11 — стаканы; 4 — стержень; 5 — прокладка; 6 — кольцо; 7 — пружина; 8 — болт; 9 — втулка; 10 — шайба

пружина 7 с комплектом прокладок 5. Стакан 3 на верхнем конце имеет запрессованный фланец с опорой, на который опирается фланец кузова 1. В нижней части опоры стержень 4 имеет болт 8 с опорой, при помощи которого опора опирается на стакан 11, приваренный к раме тележки.

В продольном направлении кузов и тележки соединены цельной низко расположенной тягой (поз. 4 на рис. 5.11 и 5.13). Ис-

ключение промежуточных звеньев системы продольной связи, применявшихся на электровозе ВЛ85, позволило упростить конструкцию, снизить вес и затраты на ремонт и обслуживание. Установка цельной тяги в целом благоприятно сказалась на динамических характеристиках экипажа.

Электровозы с высокой конструкционной скоростью движения должны обладать эффективной тормозной системой для обеспечения нормативной длины тормозного пути. В конструкции электровоза ЭП10 применена рычажная тормозная система, аналогичная по конструкции тормозной системе электровоза Ср1 (рис. 5.15).

Рычажная тормозная система выполнена с двухсторонним нажатием двухсекционных чугунных тормозных колодок на колесо с приводом от тормозного цилиндра. Применение двухсекционных колодок, когда в одном тормозном башмаке установлены две чугунные тормозные колодки, позволяет при большой силе нажатия колодок на колесо обеспечить допустимые значения удельных давлений между колодкой и колесом и отвод тепла из зоны контакта колодки и колеса. Тормозная система выполнена с двухступенчатым нажатием. При высоких скоростях движения, когда коэффициент трения между колодкой и колесом уменьшается, в тормозной цилиндр подается высокое давление, а при малых скоростях,

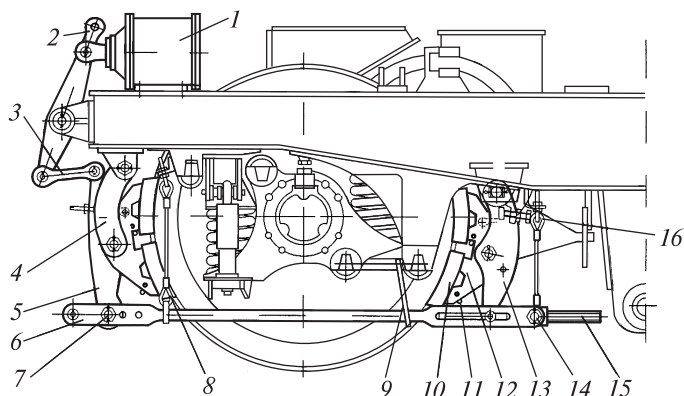


Рис. 5.15. Рычажная тормозная система электровоза ЭП10: 1 — тормозной цилиндр; 2 — балансир; 3 — планка; 4, 13 — подвески; 5 — рычаг; 6, 15 — тяги; 7 — валик; 11 — шайба; 8, 9, 16 — трос; 10 — тормозная колодка; 11 — чека; 12 — башмак; 14 — ось

когда коэффициент трения увеличивается, подается низкое давление; тем самым уменьшается нажатие колодок на бандаж и исключается явление юза на низких скоростях движения.

На каждой тележке установлено четыре тормозных цилиндра *1*, каждый из которых воздействует на четыре тормозные колодки *10* одного колеса. Тормозные цилиндры крепятся болтами к раме тележки. Тормозные безгребневые чугунные колодки *10* при помощи чек *11* крепятся к двухсекционным башмакам *12*, которые соединены с подвесками *4*, *13* и рычагом *5*. Подвески *13* подвешены непосредственно к кронштейнам, приваренным на боковинах рамы тележки. Рычаги *5*, башмаки *12* крепятся к кронштейну на раме тележки при помощи подвесок *4*. Для того чтобы безгребневые колодки не сползали с поверхности круга катания колеса, рычажные тормозные системы колес одной колесной пары в поперечном направлении соединены тормозной поперечиной в точках крепления башмаков. Рычаг *5* соединен с балансиром *2* планками *3*. Балансир *2* в верхней точке соединен с тормозным цилиндром *1*, а средней точкой закреплен на кронштейне, приваренном к вертикальному листу концевого бруса рамы тележки. Тормозные тяги *6*, охватывающие колесо с двух сторон, устанавливаются на цапфах валика *7* и оси *14*, и закрепляются гайками, образуя прямоугольную рамку.

Один конец рамки крепится к рычагу *5* валиком *7*, а другой конец рамки крепится к подвеске *13* валиком, соединяющим подвеску с тягой *15*, пропущенной в отверстие оси *14*, и зажатым гайками с двух сторон оси.

В перспективе на пассажирских электровозах с АТП будут устанавливаться дисковые тормоза.

Буксы колесных пар электровоза ЭП10 имеют три подшипника: два роликовых и один шариковый (рис. 5.16).

Весовая нагрузка от наддресорного строения передается на ось колесной пары через два роликовых подшипника *3* и *7*, а осевая сила воспринимается шариковым подшипником *10*. Для равномерного распределения осевых сил по шарикам подшипника *10* между наружными кольцами роликоподшипника *7* и шарикоподшипника *10*, а также между наружным кольцом шарикоподшипника *10* и передней крышкой *12* устанавливаются резино-металлические шайбы *9*, *11*.

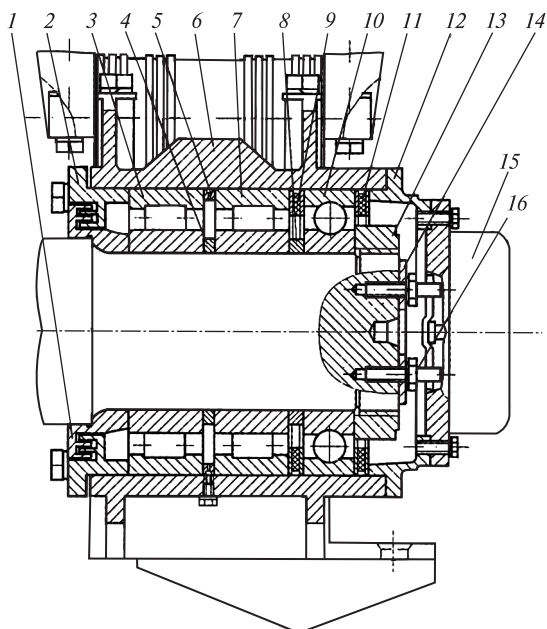


Рис. 5.16. Букса: 1 — кольцо лабиринтное; 2, 12 — задняя и передняя крышки; 3, 7 — роликоподшипники; 4, 5, 8 — кольца дистанционные; 6 — корпус; 9, 11 — шайбы; 10 — шарикоподшипник; 13 — гайка; 14 — планка; 15 — датчик угла поворота; 16 — болт

С внутреннего торца буксы закрыта лабиринтным кольцом 1, установленным на предподступичную часть оси, и крышкой 2. Канавки в кольце и крышке образуют лабиринтное уплотнение, предохраняющее от попадания в полость буксы инородных тел и вытекания смазки из буксы. Внутренние и наружные кольца роликовых подшипников разделены дистанционными кольцами 4 и 5, а внутренние кольца роликового и шарикового подшипников разделены кольцом 8.

Внутренние кольца подшипников фиксируются на оси колесной пары гайкой 13, которая контрится планкой 14, закрепленной двумя болтами в специальном пазу на оси.

Отметим, что буксы электровоза ЭП1 не имеют шарикового подшипника.

5.3.2. Конструкция тележек грузовых электровозов с АТП

За последние три десятилетия конструкции двухосных тележек грузовых электровозов прошли большой путь эволюционного развития. Электровозы ВЛ10 и ВЛ80 имели шкворневую тележку с индивидуальным рессорным подвешиванием, выполненным в виде параллельно включенных в работу винтовых цилиндрических пружин, опирающихся на листовую рессору, закрепленную на корпусе буксы.

Тележка имела опорно-осевой тяговый привод с маятниковым подвешиванием тягового двигателя к раме тележки и моторно-осевыми подшипниками скольжения. В качестве опор кузова применялось в основном люлечное подвешивание. Для демпфирования колебаний кузова относительно тележек устанавливались четыре наклонных гидродемпфера, по два с каждой стороны тележки. Для повышения тяговых свойств электровоза применялось противоразгрузочное устройство. С начала 90-х гг. XX в. тележки стали оборудоваться гребнесмазывателями АГС для снижения износа гребней.

Аналогичное устройство тележки имел первый опытный электровоз с асинхронными тяговыми двигателями ВЛ80^А-751 (см. табл. 1.11).

С 1986 г. был начат серийный выпуск двенадцатиосных грузовых электровозов ВЛ85 с осевой формулой $2(2_0-2_0-2_0)$. Электровоз ВЛ86^Ф с асинхронным тяговым приводом (см. табл. 1.11) был спроектирован на базе ходовой части ВЛ85, его тележка показана на рис. 5.17.

В конструкции тележек электровозов ВЛ85 и ВЛ86^Ф для передачи силы тяги и торможения от тележки к кузову вместо шкворневых узлов применены наклонные тяги, что способствует повышению тяговых свойств электровозов за счет более высокого коэффициента использования сцепного веса.

Наклонная тяга одним концом крепится к кронштейну тягового устройства тележки, которое было выполнено в виде ферменной конструкции, состоящей из тяги, проходящей под двигателем, и рамки.

В 2005 г. был выпущен грузовой электровоз переменного тока 2ЭС5^К «Ермак», ставший родоначальником семейства электрово-

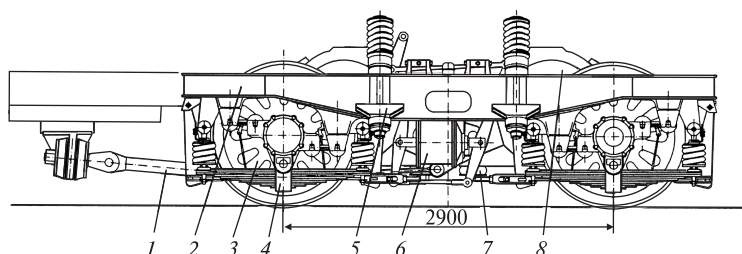


Рис. 5.17. Тележка электровоза ВЛ86 Φ : 1 — наклонная тяга; 2 — рама тележки; 3 — колесная пара; 4 — рессорное подвешивание; 5 — люлечное подвешивание; 6 — тормозная система; 7 — подвеска тягового двигателя; 8 — тяговый двигатель

зов, которое на настоящий момент включает электровозы Э5К, 2ЭС5К и 3ЭС5К, причем электровозы 2ЭС5К и 3ЭС5К имеют унифицированные тележки (рис. 5.18).

В конструкции тележек применено индивидуальное рессорное подвешивание 2, выполненное в виде винтовых цилиндрических пружин, параллельно которым для демпфирования колебаний рамы тележки 6 относительно колесных пар 3 на каждой буксе установлен гидродемпфер. Такая конструкция рессорного подвешивания позволила значительно снизить неподрессоренный вес, улучшить показатели динамики и воздействия на путь электровоза.

Рессорное подвешивание влияет на конструкцию корпуса буксы. В конструкции тележек Э5К, 2ЭС5К и 3ЭС5К применена

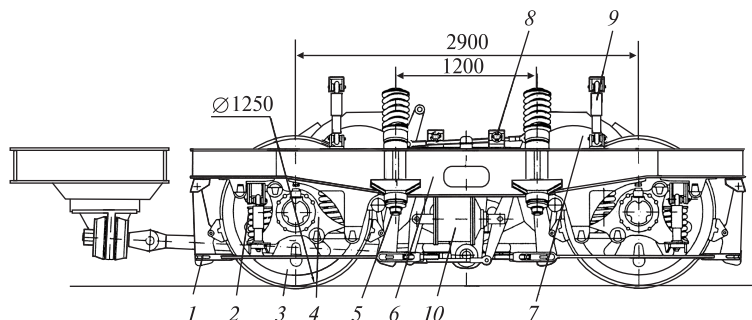


Рис. 5.18. Тележка электровозов 2ЭС5К, 3ЭС5К: 1 — тормозная система; 2 — рессорное подвешивание; 3 — колесная пара; 4 — букса; 5 — люлечное подвешивание; 6 — рама тележки; 7 — тяговый двигатель; 8 — горизонтальный гидродемпфер; 9 — вертикальный гидродемпфер; 10 — тормозной цилиндр

унифицированная крыльчатая букса, на кронштейны которой устанавливаются пружины рессорного подвешивания. Посадочный диаметр оси (буксовая шейка) колесной пары под подшипники — 180 мм.

Подвешивание кузова выполнено в виде люлечного подвешивания 5, а для демпфирования колебаний кузова относительно тележек применена раздельная по видам колебаний система демпфирования, для этого в кузовной ступени подвешивания установлены четыре вертикальных 9 и два горизонтальных 8 гидродемпфера.

Для передачи силы тяги и торможения от тележки к кузову применена цельная наклонная тяга, которая одним концом крепится к кронштейну, расположенному на нижнем листе средней балки рамы тележки, а другим — к вилке буферного устройства, расположенного на раме кузова. Такая конструкция позволяет иметь высокие тяговые свойства электровоза за счет высокого значения коэффициента использования сцепного веса и при этом не препятствовать вписыванию тележки в кривые участки пути, как это наблюдается у тележек электровоза ВЛ85, где наклонная тяга закреплена к кронштейну тягового устройства тележки, расположенного в районе оси колесной пары. Кроме этого отказ от тягового устройства тележки позволил уменьшить вес системы наклонной тяги на 2,40 кН и сократить количество сферических подшипников с шести до двух. Впервые цельная наклонная тяга была применена в конструкции электровоза ЭП10 (см. п. 5.3.1).

Тормозная система тележки снабжена 14-дюймовым тормозным цилиндром 10.

Колесно-моторный блок выполнен с опорно-осевым подвешиванием тяговых двигателей (см. ниже п. 5.4.2).

Конструкция тележек грузовых электровозов постоянно совершенствуется. Для снижения воздействия электровоза на путь и уменьшения затрат на обслуживание и ремонт в эксплуатации, на опытном электровозе ЗЭС5К № 001 впервые для этой серии применено кузовное подвешивание в виде пружин, работающих на сжатие и сдвиг (опоры «флексикойл», см. п. 5.3.1). В конструкции электровоза Э5К такая конструкция опор кузова применяется серийно с № 001.

Внедрение опор «флексикойл» в конструкции кузовного подвешивания электровозов позволило улучшить динамические показатели электровоза ЗЭС5К (рис. 5.19 и 5.20).

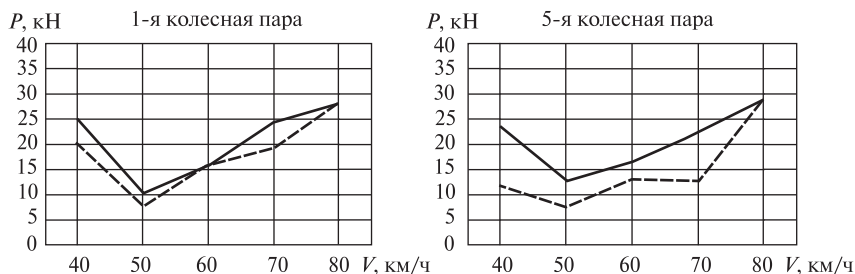


Рис. 5.19. Рамные силы электровозов 3ЭС5К с люлечным подвешиванием (сплошная линия) и опорами «флексикойл» (пунктир) в кривых

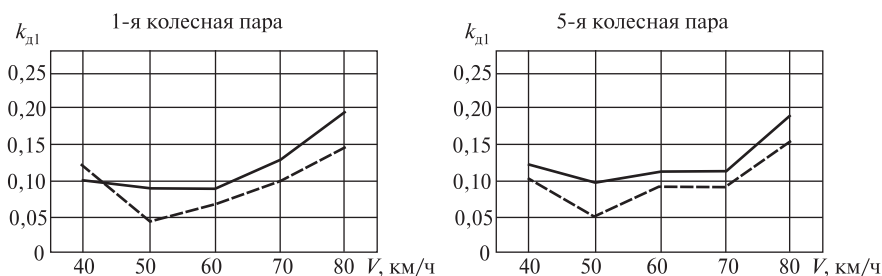


Рис. 5.20. Коэффициент вертикальной динамики первой ступени подвешивания электровозов 3ЭС5К с люлечным подвешиванием (сплошная линия) и опорами «флексикойл» (пунктир) в кривых

Конструкция тележек современных отечественных грузовых электровозов соответствует тенденциям в мировом локомотивостроении, таким как применение наклонных тяг для передачи сил тяги и торможения; использование опор «флексикойл» в кузовной ступени подвешивания; индивидуальное рессорное подвешивание колесных пар; эффективное демпфирование как буксового рессорного подвешивания, так и кузовного, применение моторно-осевых подшипников качения и зубчатых колес с твердыми рабочими поверхностями зубьев.

На базе тележек электровозов семейства «Ермак» предполагается создать тележки для грузовых электровозов 2ЭС5 с асинхронным тяговым приводом.

5.3.3. Конструкция тележек грузовых тепловозов с АТП

В связи с известными компоновочными особенностями магистральных тепловозов, а именно — расположению дизеля и топливных баков посередине длины кузова, каждая секция тепловоза опирается на две трехосные тележки.

Тележки магистральных грузовых тепловозов 2ТЭ10В и 2ТЭ116 с коллекторными тяговыми двигателями унифицированы (рис. 5.21).

Рама тележки 1 опирается на буксы колесно-моторных блоков через пружины 7 рессорного подвешивания.

На тележке установлены три колесно-моторных блока 8. Тяговый электродвигатель имеет опорно-осевую подвеску. На ось

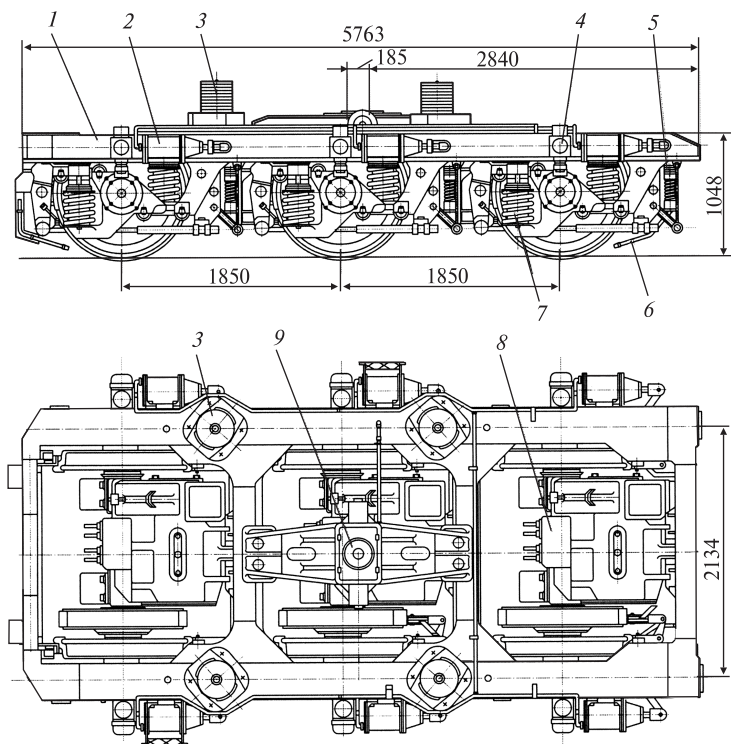


Рис. 5.21. Унифицированная тележка грузового тепловоза: 1 — рама; 2 — тормозной цилиндр; 3 — опора кузова; 4 — фрикционный демпфер; 5 — траверсная подвеска ТЭД; 6 — подсыпная труба; 7 — пружина; 8 — колесно-моторный блок; 9 — гнездо подпятника для шкворня

колесной пары он опирается через моторно-осевые подшипники скольжения, а к раме тележки 1 ТЭД крепится при помощи траверсной подвески 5. Для демпфирования вертикальных колебаний рамы тележки относительно колесных пар устанавливаются фрикционные демпферы 4. Тормозная система тележки выполнена с двухсторонним нажатием тормозных колодок на колесо с индивидуальным приводом от тормозного цилиндра 2 для каждого колеса. Кузов опирается на тележку через четыре резино-роликовые опоры 3. Упругим элементом в опоре 3 является комплект резино-металлических шайб с суммарным статическим прогибом 15 мм.

Для подачи песка под колеса по ходу движения устанавливаются подсыпные трубы 6. Рама тележки в верхней части имеет гнездо подпятника для шкворня 9.

Трехосные тележки имеют ряд недостатков, прежде всего большую базу тележки и большой момент инерции относительно вертикальной оси, проходящей через центр поворота тележки. Это негативно влияет на вписывание тележки в кривые участки пути и в конечном итоге на подрез гребней и износ рельсов. Кроме того, унифицированная тележка имеет недостаточный статический прогиб кузовной ступени подвешивания.

При проектировании грузового тепловоза 2ТЭ25А с асинхронным тяговым приводом были приняты меры для устранения перечисленных недостатков.

Тележка тепловоза 2ТЭ25А (рис. 5.22) выполнена с радиальной установкой колесных пар для улучшения вписывания в кривые участки пути. Кузов опирается на тележки при помощи десяти опор «флексикойл», расположенных по пять на каждой боковине рамы тележки 1. Для демпфирования колебаний кузова относительно тележки установлены четыре вертикальных гидродемпфера, по два с каждой стороны тележки.

Трехосная тележка с радиально устанавливающимися крайними колесными парами состоит из рамы 1, которая через пружины 8 буксового рессорного подвешивания опирается на буксы 10 колесных пар 6, 9, 13. Буксы крайних колесных пар 6, 13 соединяются тягами 5 с поперечными направляющими балансирами 4, которые шарнирно закреплены на поперечных балках рамы тележки 1. Буксы 10 среднего колесно-моторного блока связаны тягами 5 с кронштейнами на раме тележки. Шарнирно-рычажные механизмы, установленные с двух сторон, состоят из продольных

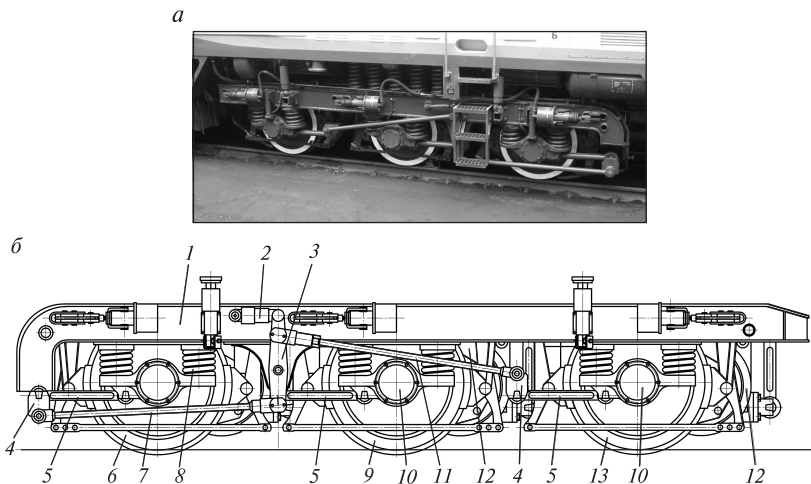


Рис. 5.22. Тележка тепловоза 2ТЭ25А: *а* — общий вид; *б* — конструкция; 1 — рама тележки; 2 — гидродемпфер; 3 — рычаг; 4 — направляющий балансир; 5 — тяга; 6, 9, 13 — колесные пары; 7, 11 — продольные штанги; 8 — пружина; 10 — буска; 12 — тяговый двигатель

штанг 7, 11, шарнирно соединяющих концы поперечных балансиров 4 с вертикальным двуплечим рычагом 3, который шарнирно установлен на боковине рамы тележки 1. К одному из плеч вертикального двуплечего рычага 3 с каждой стороны тележки присоединен гидродемпфер 2, второй конец которого шарнирно закреплен на раме тележки 1.

При входе в кривой участок пути направляющая колесная пара 6 набегают на наружный рельс. За счет боковой силы колесная пара разворачивается по направлению к центру кривой, занимая радиальное положение. Шарнирно-рычажный механизм тележки, состоящий из продольных штанг 7, 11 и вертикальных двуплечих рычагов 3, обеспечивает равное и противоположное по направлению перемещение задней колесной пары колесно-моторного блока 13. Гидравлические демпферы демпфируют колебания влияния крайних колесных пар 6 и 13 при движении в прямых и кривых участках пути, что улучшает динамические качества тележки.

В конструкции букс применен кассетный конический подшипник, что позволяет исключить его обслуживание до подъемного ремонта тепловоза.

Тяговый двигатель имеет опорно-осевое подвешивание с моторно-осевыми подшипниками качения, в качестве которых применены роликовые конические подшипники.

Тормозная система тележки выполнена с двухсторонним нажатием тормозных колодок на колесо, привод осуществляется от одного тормозного цилиндра на каждое колесо.

5.4. Тяговый привод

Механический тяговый привод (силовая передача) является наиболее сложным и ответственным узлом экипажной части локомотива. При создании локомотивов нового поколения, оснащенных асинхронными тяговыми двигателями, одной из основных задач является выбор схемы и конструкции тягового привода как механизма.

Привод соединяет тяговый двигатель, который частично или полностью подрессорен, с колесной парой, которая является не-подрессоренной частью экипажа. Назначение тягового привода состоит в передаче момента как в режиме тяги (от вала двигателя к колесной паре), так и в режиме электрического торможения (в обратном направлении). Этот момент является полезной нагрузкой. При предварительных расчетах тяговых характеристик и оценках прочности узлов привода обычно полагают, что в заданном режиме момент есть величина постоянная. В действительности переходные процессы в электрических цепях и сложный спектральный состав электромагнитного момента на валу АТД, с одной стороны, и воздействие со стороны пути — с другой, обуславливают колебательный характер передаваемого момента. При этом в отдельных режимах динамическая составляющая не только близка по величине к статической (расчетной), но и значительно превосходит ее. Из-за наличия зазоров возможно возникновение ударных нагрузок.

5.4.1. Механический тяговый привод пассажирских электровозов с АТП

Пассажирские электровозы имеют высокую конструкционную скорость. Отсюда вытекает необходимость снижения неподрессоренного веса для уменьшения воздействия на путь, а также необходимость виброзащиты тяговых двигателей, которые с этой це-

лю устанавливают на раме тележки. Кроме того, тяговая передача должна быть защищена от динамического момента, вызываемого вертикальными колебаниями надрессорного строения.

В связи с вышеизложенным на пассажирских электровозах с АТП должен применяться, согласно «Типажу», тяговый привод третьего класса (опорно-рамное подвешивание тяговых двигателей и тяговых редукторов). Для электровозов переходного периода допускается применение тягового привода второго класса (опорно-рамное подвешивание тяговых двигателей и опорно-осевое подвешивание тяговых редукторов).

Тяговый привод второго класса. Схема тягового привода второго класса показана на рис. 5.23. Тяговый привод второго класса пассажирских электровозов ЭП1 и ЭП10 приведен на рис. 5.24.

При проектировании тяговых приводов этих электровозов были учтены недостатки прежних конструкций, к которым следует отнести высокую торсионную жесткость передаточного механизма и соответственно воздействие на привод возмущений от вертикальных перемещений рамы тележки относительно колесной пары. Торсионная жесткость передаточного механизма была снижена при помощи установки резинокордной муфты, которая в диапазоне осевых сил, не превышающих сил трения в зацепле-

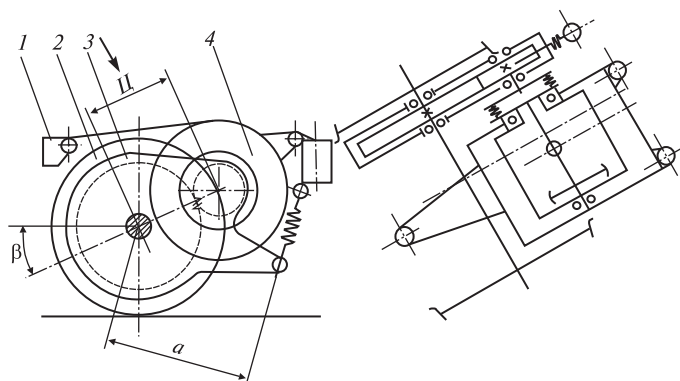


Рис. 5.23. Схема тягового привода второго класса (опорно-рамное подвешивание ТЭД и опорно-осевое подвешивание тягового редуктора): 1 — рама тележки; 2 — колесная пара; 3 — тяговый редуктор; 4 — тяговый двигатель; Π — межосевое расстояние тяговой зубчатой передачи; a — плечо подвески редуктора; β — угол наклона

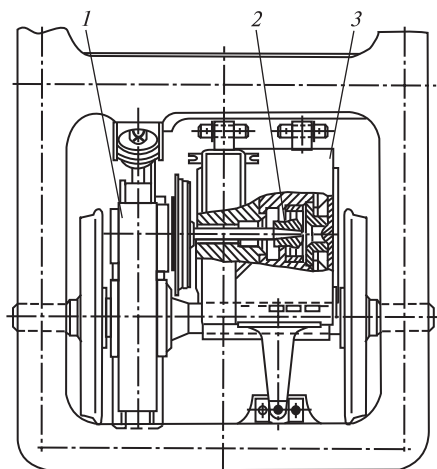


Рис. 5.24. Схема тягового привода электровозов ЭП1 и ЭП10: 1 — тяговый редуктор; 2 — передаточный механизм; 3 — тяговый двигатель

нии зубчатой муфты, позволяет также компенсировать осевые перемещения передаточного механизма.

Тяговый привод электровозов ЭП1 и ЭП10 во многом унифицирован. Редуктор отличается лишь передаточным отношением, которое у редуктора ЭП1 равно 3,269, а у редуктора ЭП10 — 3,696, причем зубчатые колеса одинаковые.

Передаточный механизм привода (рис. 5.25) состоит из торсионного вала, который при помощи зубчатой муфты с бочкообразными зубьями, установленной внутри ротора двигателя, передает вращающий

момент к редуктору через резинокордную муфту, установленную на противоположной стороне торсионного вала и соединенную с

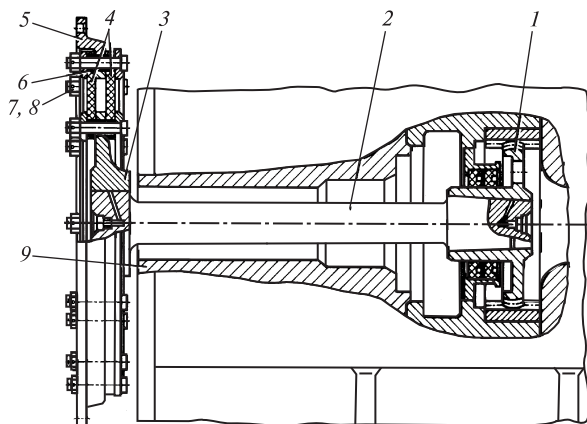


Рис. 5.25. Передаточный механизм: 1 — зубчатая полушестерня; 2 — торсионный вал; 3 — ступица; 4 — резинокордный элемент; 5 — корпус муфты; 6 — дистанционная втулка; 7 — стяжной болт; 8 — гайка; 9 — ротор тягового двигателя

приводным фланцем редуктора. Установка резинокордной муфты не только уменьшает торсионную жесткость передаточного механизма, но и решает задачу поперечного разделения масс, т.е. за счет поперечной жесткости резинокордная муфта защищает привод от инерционного воздействия неподрессоренных масс редуктора и колесной пары при поперечных перемещениях колесной пары относительно рамы тележки. При этом зубчатая муфта вступает в работу только в том случае, когда поперечная сила, действующая на передаточный механизм, превышает величину силы трения, возникающей в зацеплении зубчатой муфты.

В табл. 5.7 приводятся основные параметры тяговых зубчатых передач электровозов ЭП1 и ЭП10.

Таблица 5.7

Параметры тяговых зубчатых передач электровозов ЭП1 и ЭП10

Тип электровоза	ЭП1	ЭП10
Тип зубчатой передачи	шевронная	шевронная
Модуль нормальный, мм	10	10
Число зубьев: шестерни зубчатого колеса	26 85	23 85
Передаточное отношение редуктора	3,269	3,696
Межосевое расстояние редуктора, мм	616	602
Степень точности изготовления по ГОСТ1643—81: шестерни зубчатого колеса	8A 8A	7-6-6-B 7-6-6-B
Упрочнение зубьев: шестерни зубчатого колеса	цементация и закалка закалка ТВЧ	цементация и закалка закалка ТВЧ
Твердость рабочих поверхностей зубьев, HRC: шестерни зубчатого колеса	59 $\pm$ 3 51 $\pm$ 3	59 $\pm$ 3 51 $\pm$ 3
Суммарная крутильная жесткость торсионного вала и муфты, (кН·м)/рад	275	275

Опыт эксплуатации электровозов ЭП1 и ЭП10 показал, что применение привода второго класса обеспечивает нормативные

показатели динамики и воздействия на путь электровоза при скоростях движения до 160 км/ч.

Отметим, что тяговые приводы второго класса не нашли широкого применения в конструкции европейских электровозов с асинхронным тяговым приводом, но они широко применяются в конструкциях высокоскоростных поездов (такой привод установлен на поезде «Сапсан»).

Тяговый привод третьего класса. Схема тягового привода третьего класса показана на рис. 5.26.

Основными конструктивными особенностями тягового привода третьего класса являются: наименьший неподрессоренный вес, и, как следствие, меньшее воздействие локомотива на путь, снижение динамических нагрузок на элементы привода и повышение их долговечности, снижение динамического момента в приводе и повышение КПД тяговой передачи и тяговых свойств локомотива.

По расположению шестерни тяговые приводы с опорно-рамным подвешиванием тягового двигателя и редуктора можно разделить на три типа:

- с консольным расположением шестерни;
- с установкой шестерни на валу тягового двигателя между двумя подшипниками с несимметричным расположением шестерни относительно подшипников (шестерня располагается близко от одного из подшипников);

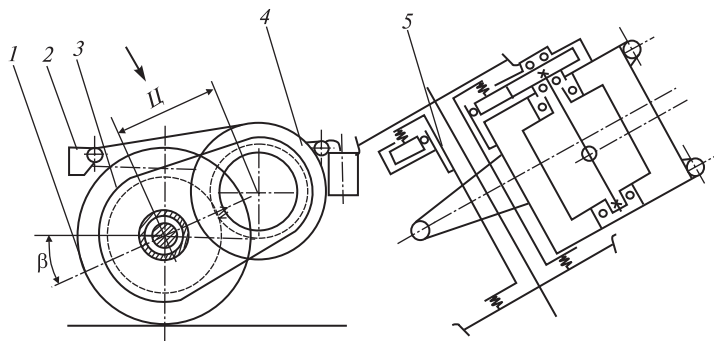


Рис. 5.26. Схема тягового привода третьего класса (опорно-рамное подвешивание ТЭД и тягового редуктора): 1 — колесная пара; 2 — рама тележки; 3 — тяговый редуктор; 4 — тяговый двигатель; 5 — полый вал; Ц — межосевое расстояние тяговой зубчатой передачи; β — угол наклона

— с симметричной установкой шестерни относительно опорных подшипников вала шестерни.

В соответствии с требованиями «Типажа» (см. табл. 1.13) перспективные пассажирские электровозы будут оснащены тяговым приводом третьего класса.

5.4.2. Механический тяговый привод грузовых электровозов с АТП

Согласно требованиям «Типажа» грузовые локомотивы должны иметь тяговый привод первого класса (опорно-осевое подвешивание ТЭД и тягового редуктора) и моторно-осевые подшипники (МОП) качения. Такой тяговый привод (рис. 5.27) традиционно применялся на грузовых электровозах ВЛ10, ВЛ80 и др. Тяговый двигатель опирается одной стороной на поперечный брус рамы тележки при помощи подвески с резиновыми шайбами, а другой — на ось колесной пары через моторно-осевые подшипники. Тяговая зубчатая передача — двухсторонняя, жесткая, косозубая, передаточное число равно $88:21 = 4,19$. Нормальный модуль зубчатых колес 10 мм, централь — 604 мм. Отметим, что межосевое расстояние зубчатой передачи непостоянно, осевой разбег двигателя и колесной пары в процессе эксплуатации может изменяться по причине износа вкладышей МОП.

Колесно-моторный блок электровозов семейства «Ермак» (рис. 5.28) выполнен с двухсторонней тяговой зубчатой передачей, ее

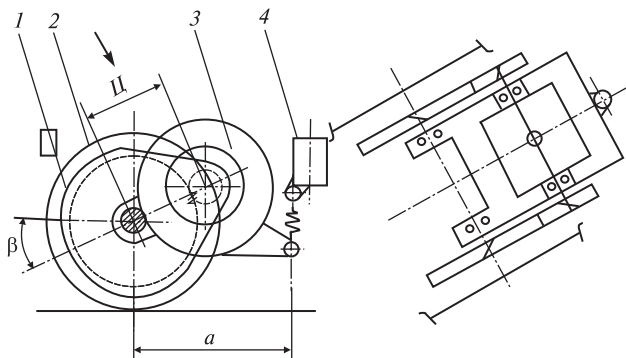


Рис. 5.27. Схема тягового привода первого класса (опорно-осевое подвешивание ТЭД и тягового редуктора): 1 — тяговый редуктор; 2 — колесная пара; 3 — тяговый двигатель; 4 — рама тележки; Ц — межосевое расстояние (центральный) тяговой зубчатой передачи; a — плечо подвески тягового двигателя; β — угол наклона

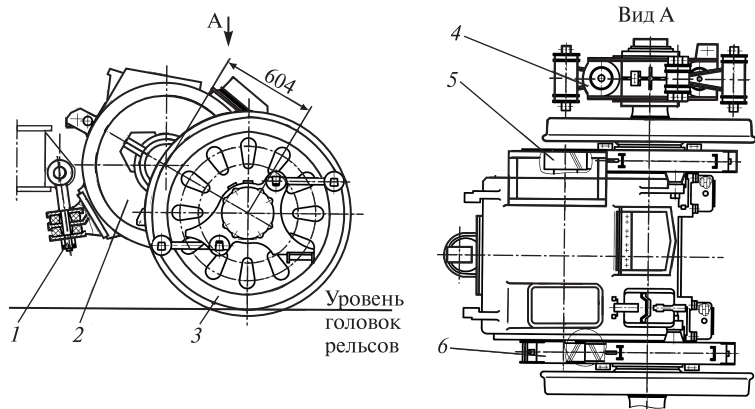


Рис. 5.28. Колесно-моторный блок грузового электровоза: 1 — подвеска тягового двигателя; 2 — тяговый двигатель; 3 — колесная пара; 4 — букса; 5 — зубчатая передача; 6 — кожух зубчатой передачи

конструкция аналогична конструкции тяговой зубчатой передачи электровозов ВЛ80 и ВЛ85.

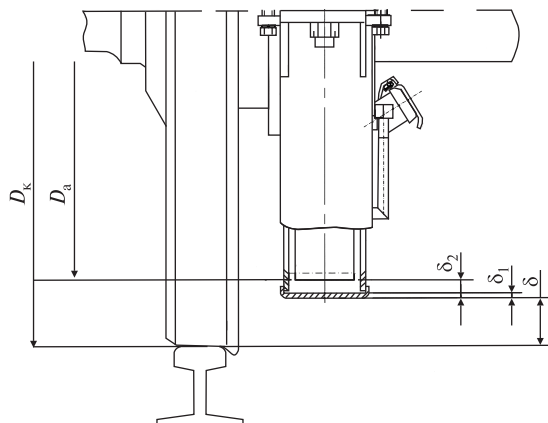
В отличие от нее, где зубчатое колесо изготовлено из объемно-улучшенной стали 55Ф, зубчатые колеса блока выполнены из стали 45ХН с последующей закалкой ТВЧ рабочих поверхностей зубьев. Шестерни изготовлены из поковок легированной стали 20ХН3А с последующей цементацией и закалкой зубьев по контуру.

Особенностью применения термоупрочненных зубчатых колес является то, что финишной операцией по их обработке является шлифовка рабочих поверхностей зубьев. Применение термоупрочненных зубчатых колес позволяет увеличить ресурс зубчатой передачи.

Для грузовых электровозов с АТП необходимо обеспечить требуемые показатели по долговечности тяговой зубчатой передачи. Этого можно достичь, применяя цементируемые марки стали 20ХН3А, 20Х2Н4А для изготовления зубчатых колес.

Определение геометрических параметров тяговой зубчатой передачи. Для обеспечения максимального передаточного отношения зубчатой передачи необходимо полностью использовать габарит электровоза. Поэтому при проектировании зубчатых передач определяют максимально возможный диаметр окружности выступов зубчатого колеса (рис. 5.29), исходя из предельного использования

Рис. 5.29. Определе-
ние диаметра окруж-
ности выступов зуб-
чатого колеса



габарита подвижного состава по низу. Диаметр окружности выступов зубчатого колеса определяют по формуле:

$$D_a = 2(D_k/2 - \delta - \delta_1 - \delta_2),$$

где D_k — диаметр круга катания колеса;

δ — расстояние от уровня головок рельсов до низа корпуса редуктора или кожуха зубчатой передачи;

δ_1 — толщина нижнего листа корпуса редуктора или кожуха зубчатой передачи;

δ_2 — зазор между нижним листом корпуса редуктора или кожуха зубчатой передачи и окружностью выступов зубчатого колеса.

Определив диаметр окружности выступов и задаваясь величиной нормального модуля (обычно в тяговых зубчатых передачах локомотивов принимают нормальный модуль равным 10 мм) и углом наклона зубьев зубчатой передачи, рассчитывают количество зубьев зубчатого колеса.

Затем, исходя из диаметра двигателя, определяют минимальное межосевое расстояние, которое должно обеспечить максимальное передаточное отношение зубчатой передачи при заданном модуле и угле наклона зубьев зубчатой передачи. После выбора величины межосевого расстояния подбирают количество зубьев шестерни. В случае необходимости, когда не обеспечивается прочность тела шестерни, увеличивают количество зубьев шестерни, увеличивая тем самым ее делительный диаметр, но при этом увеличивается межосевое расстояние и уменьшается передаточное отношение зубчатой передачи.

Расчет геометрии зубчатой передачи выполняется в соответствии с ГОСТ 16532—70.

Передаточное отношение зубчатой передачи равно

$$u = \frac{z_2}{z_1},$$

где z_1 — число зубьев шестерни;

z_2 — число зубьев колеса.

Увеличение передаточного отношения зубчатой передачи способствует лучшей реализации преимуществ асинхронного тягового двигателя по сравнению с коллекторным. При высокой частоте вращения ротора можно спроектировать тяговый двигатель меньших размеров и меньшей массы.

Дело в том, что частота вращения коллекторного двигателя ограничена окружной скоростью по условию обеспечения контакта (при высоких скоростях вращения не обеспечивается нормальный электрический контакт между щетками и коллектором). В настоящее время коллекторные тяговые двигатели электровозов полностью исчерпали этот резерв и их частота вращения не может быть увеличена.

Асинхронные тяговые двигатели лишены этого недостатка; их частота вращения ограничена только допустимой частотой вращения подшипников ротора тягового двигателя. В свою очередь частота вращения подшипников зависит от их грузоподъемности, заданной долговечности и габаритных размеров. Поэтому при проектировании тяговых приводов с АД необходимо предусматривать такие схемы приводов, при которых обеспечивается меньшая нагрузка подшипников, что гарантирует применение подшипников меньшей грузоподъемности, но с большей допустимой частотой вращения.

Расчет на прочность тяговых зубчатых передач. Зубчатые колеса тяговых зубчатых передач рассчитывают на контактную выносливость активных поверхностей зубьев и на выносливость при изгибе. После этого осуществляют проверку на контактную прочность при действии максимальной нагрузки и расчет на малоцикловую выносливость при изгибе. Расчет выполняют в соответствии с ГОСТ 21354—87 «Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные. Расчет на прочность».

5.4.3. Механический тяговый привод грузовых тепловозов с АТП

В конструкции грузовых тепловозов в основном применяется тяговый привод первого класса с односторонним расположением шестерни. Конструкция колесно-моторного блока грузового тепловоза показана на рис. 5.30.

Тяговый электродвигатель 1 опирается на ось колесной пары 3 через моторно-осевые подшипники, которые расположены в буксах этих подшипников 7. С другой стороны тяговый электродвигатель 1 опирается на раму тележки при помощи подвески тягового двигателя. Шестерня 5 напрессована на вал тягового электродвигателя 1, а зубчатое колесо 6 — на ось колесной пары 3. Шестерня 5 и зубчатое колесо 6 образуют зубчатую передачу. В конструкции тепловозов применяется прямозубая передача. Зубчатая передача защищена от воздействия окружающей среды кожухом зубчатой передачи 4, он же служит емкостью для смазки.

Из-за тяжелых условий работы шестерни и зубчатые колеса изготавливают из легированных сталей. Шестерни выполняют из стали 12Х2Н4А или 20Х2Н4А с последующей цементацией на глубину 1,6—1,9 мм (поле чистовой обработки) и закалкой до твердости рабочих поверхностей зубьев 60 HRC, а твердость сердцевины зуба и тела шестерни должна быть 30—45 HRC. Зубчатые колеса или их венцы изготавливают из стали 45ХН. Рабочие поверхности зубьев зубчатых колес закаливают при помощи ТВЧ до твердости

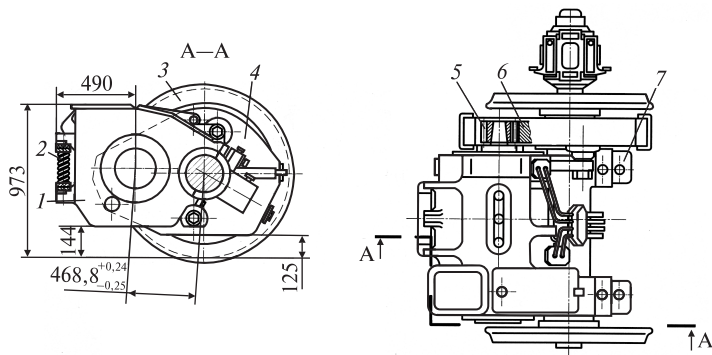


Рис. 5.30. Колесно-моторный блок тепловоза: 1 — тяговый электродвигатель; 2 — подвеска тягового двигателя (траверса); 3 — колесная пара; 4 — кожух зубчатой передачи; 5 — шестерня; 6 — зубчатое колесо; 7 — букса моторно-осевого подшипника

У тепловоза 2ТЭ25А, в отличие от ранее выпускавшихся, применено маятниковое подвешивание тяговых двигателей взамен траверсы.

В конструкции тепловозов 2ТЭ10В, 2ТЭ10М, 2ТЭ116 производства Луганского тепловозостроительного завода нашли широкое применение упругие самоустанавливающиеся зубчатые колеса (УЗК), конструкция которых представлена на рис. 5.32.

340

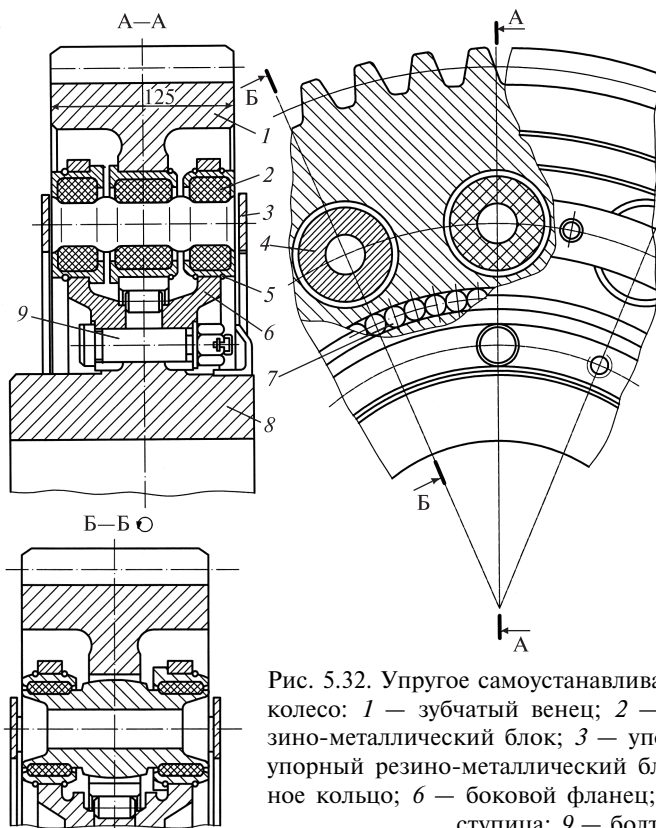


Рис. 5.32. Упругое самоустанавливающееся зубчатое колесо: 1 — зубчатый венец; 2 — эластичный резино-металлический блок; 3 — упорный диск; 4 — упорный резино-металлический блок; 5 — стопорное кольцо; 6 — боковой фланец; 7 — ролик; 8 — ступица; 9 — болт

способствует самоустановке венца при перекосах осей шестерни и зубчатого колеса. Дорожки для роликов на зубчатом венце 1 и ступице 8 выполнены сферическими и закалены при помощи ТВЧ до твердости 40—45 HRC. В направлении вращения зубчатый венец 1 связан с двумя боковыми фланцами 6 посредством чередующихся восьми упорных резинометаллических блоков 4 (показан в сечении Б—Б) и восьми эластичных резино-металлических блоков 2 (показан в сечении А—А). В осевом направлении резино-металлические блоки 2, 4 фиксируются стопорными кольцами 5 и упорными дисками 3, приклепанными снаружи к боковым фланцам УСЗК. Боковые фланцы 6 соединены со ступицей 8 посредством болтов 9, затянутых гайками.

При трогании тепловоза с места и его разгоне, когда величина вращающего момента достигает наибольших значений, деформируются сначала эластичные резино-металлические блоки 2, а затем, когда зазор выбирается, — упорные резино-металлические блоки 4; таким образом упорные резино-металлические блоки 4 ограничивают деформацию эластичных резино-металлических блоков 2 и предотвращают их разрушение при пиковых нагрузках.

С увеличением скорости движения крутящий момент становится меньше, и упорные резино-металлические блоки 4 выходят из работы. Низкая торсионная жесткость эластичных резино-металлических блоков 2 способствует снижению динамических нагрузок в тяговой передаче, вызванных возрастающими возмущениями от прохождения неровностей пути. Кроме этого эластичные резино-металлические блоки 2 способствуют самоустановке зубчатого венца 1 при перекосах осей шестерни и зубчатого колеса, тем самым обеспечивая более равномерное распределение нагрузки по длине зубьев, находящихся в зацеплении.

В эксплуатации были выявлены недостатки, присущие УС-ЗК рассматриваемой конструкции. К ним следует отнести низкий ресурс резино-металлических блоков, который составил 400—600 тыс. км, т.е. их приходилось заменять на ТР-3, а также предельный износ беговых дорожек и отверстий для резино-металлических блоков в венце и боковых фланцах после пробега 1,5—1,6 млн км, которые необходимо восстанавливать на заводских ремонтах.

Традиционно в конструкции тепловозов с опорно-осевой подвеской тяговых двигателей применяются моторно-осевые подшипники (МОП) скольжения с разъемными вкладышами, которые сначала изготавливали из бронзы ОЦС5-5-5, а затем из высокосвинцовой бронзы ОЦС4-4-17. Поверхность, соприкасающаяся с осью колесной пары, заливается баббитом оловянным Б-83 и для исключения кромочных напряжений обрабатывается по гиперболу.

Для нормальной работы подшипников скольжения необходима хорошая смазываемость рабочих поверхностей; значительное число повреждений МОП связано с нарушением подачи смазки.

МОП скольжения обладают рядом недостатков, к которым следует отнести:

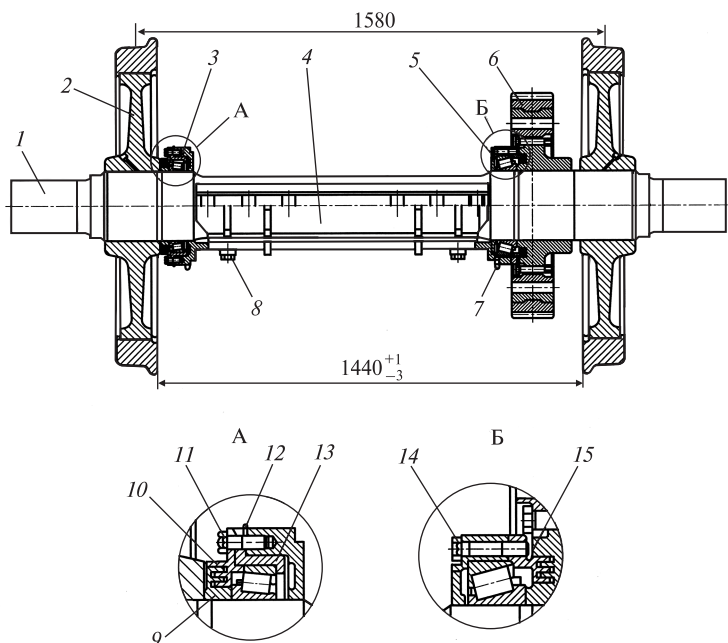


Рис. 5.33. Колесная пара с моторно-осевыми подшипниками качения: 1 — ось колесной пары; 2 — колесо; 3, 5 — подшипники; 4 — корпус подшипника; 6 — упругое зубчатое колесо; 7 — масленка; 8 — болт крепления корпуса подшипника; 9 — лабиринтное кольцо; 10, 15 — крышки подшипников; 11, 14 — болты крепления крышки подшипника; 12 — проставочное кольцо; 13 — стакан

— повышенный износ, достигающий 3 мм, что ухудшает работу зубчатой передачи в связи с изменением межосевого расстояния и возникающих угловых перекосов осей шестерни и зубчатого колеса;

— постоянное обслуживание в эксплуатации (проверка уровня смазки и пополнение ее) в связи с утечками смазки из букс моторно-осевых подшипников, вызванной вибрацией узла и увеличением зазора в МОП из-за их износа.

Поэтому локомотивостроительные компании внедряют в конструкцию выпускаемых локомотивов МОП качения, у которых отсутствуют вышеперечисленные недостатки.

Специалистами ВНИКТИ для грузовых тепловозов разработан колесно-моторный блок с МОП качения, в конструкции которого применяются роликовые конические подшипники. Колесная пара с роликовыми коническими подшипниками показана на рис. 5.33. На ось колесной пары 1 напрессованы подшипники 3, 5. Прессовая посадка подшипников обеспечивается их тепловой посадкой с предварительным нагревом до 90—100 °С. На подшипник 5 с одной стороны надевается корпус 4, а с другой — крышка 15, которые стягиваются между собой болтами 14. На подшипник 3 с одной стороны надевается стакан 13, на него корпус 4, а с другой стороны — крышка 10. Осевой зазор подшипников, равный 0,2—0,3 мм, регулируется проставочным кольцом 12, которое устанавливается между стаканом 13 и корпусом 4. Крышка 10, стакан 13, проставочное кольцо 12 и корпус 4 стягиваются между собой болтами 11. Со стороны подшипника 5 напрессовывается ходовое колесо 2, а со стороны подшипника 3 на ось колесной пары 1 напрессовывается лабиринтное кольцо 9 и ходовое колесо 2. Подшипники 3, 5 и свободные полости подшипниковых узлов заполняются консистентной смазкой. Для пополнения смазки в подшипниковых узлах служат масленки 7.

Аналогичная конструкция моторно-осевых подшипников качения применена на тепловозе 2ТЭ25А.

Глава 6. РАСЧЕТЫ И ИСПЫТАНИЯ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ПРИВОДА ЛОКОМОТИВОВ

В главе 6 рассмотрены вопросы, связанные с компьютерным моделированием процессов, происходящих в АТП локомотивов, и с проведением натурных испытаний асинхронных тяговых двигателей и привода в целом.

Рекомендуемая литература: [1, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 13, 17, 19, 22].

6.1. Компьютерная модель локомотива как управляемой электромеханической системы

6.1.1. Структура компьютерной модели

При разработке схем и конструкций локомотивов с асинхронным тяговым приводом используется много новых технических решений, что требует наличия эффективных инструментов исследования на стадии проектных проработок. Чтобы добиться совместимости основных элементов АТП в рабочих и аварийных режимах, необходимо спрогнозировать возможные ситуации, возникающие при движении локомотива, учесть состояние пути, контактной сети (для электровозов), систем управления и сигнализации. Для решения этих задач целесообразно применять комплексное компьютерное моделирование.

В настоящее время в области создания компьютерных моделей для исследования электромеханических процессов в тяговом приводе локомотивов накоплен определенный опыт. В большинстве известных компьютерных моделей механическая часть локомотива представляется в виде системы твердых тел, соединенных упругими и диссипативными элементами.

Для представления процессов в электрической части, как правило, используются методы теории цепей в режимах, требующих подробного изучения, а также применяются полевые расчеты.

Известны модели, созданные на базе пакета MathLab Simulink. Однако применение исключительно Simulink накладывает существенные ограничения на создание полноразмерной модели механи-

ческой части. Поэтому в некоторых исследованиях в качестве среды для создания модели механической части используется система ADAMS Rail, а процессы в электрооборудовании моделируются с применением Simulink.

На основе таких подходов все же не удается получить эффективную модель, адекватно представляющую совместные динамические процессы в полноразмерной электромеханической системе локомотива. Поэтому была предложена специализированная комплексная компьютерная модель электровоза как управляемой электромеханической системы. Она разработана применительно к пассажирскому электровозу ЭП10, который является двухсистемным, т.е. может питаться как от сети постоянного тока ($= 3 \text{ кВ}$), так и от переменного ($\sim 25 \text{ кВ}$, 50 Гц).

В настоящее время модель используется при проектировании перспективных электровозов с асинхронным тяговым приводом. Электровоз рассматривается как управляемая электромеханическая система, имеющая в своем составе следующие подсистемы:

- механическую часть (подвижно соединенные между собой кузов, рамы тележек, колесные пары и т.д.);
- электрическую часть (тяговые преобразователи и асинхронные тяговые двигатели);
- систему управления (алгоритмы управления, реализованные в виде управляющих программ).

Модель построена по модульному принципу. На рис. 6.1 показана структура модели электровоза с АТП применительно к питанию от сети переменного тока; при питании от сети постоянного тока в составе электрической части будут другие входные преобразователи (см. гл. 3). При моделировании тепловоза с электрической передачей переменного тока в состав модели включается подсистема «дизель—генератор».

На стадии проектных проработок необходимо подробно изучить взаимосвязанные электромеханические процессы, возникающие в различных режимах работы локомотива, и создать соответствующие алгоритмы управления.

Основные вопросы, которые подлежат изучению, следующие:

- динамические процессы в электрической и механической частях, определение характера изменения и предельных значений возникающих механических нагрузок, токов, напряжений;

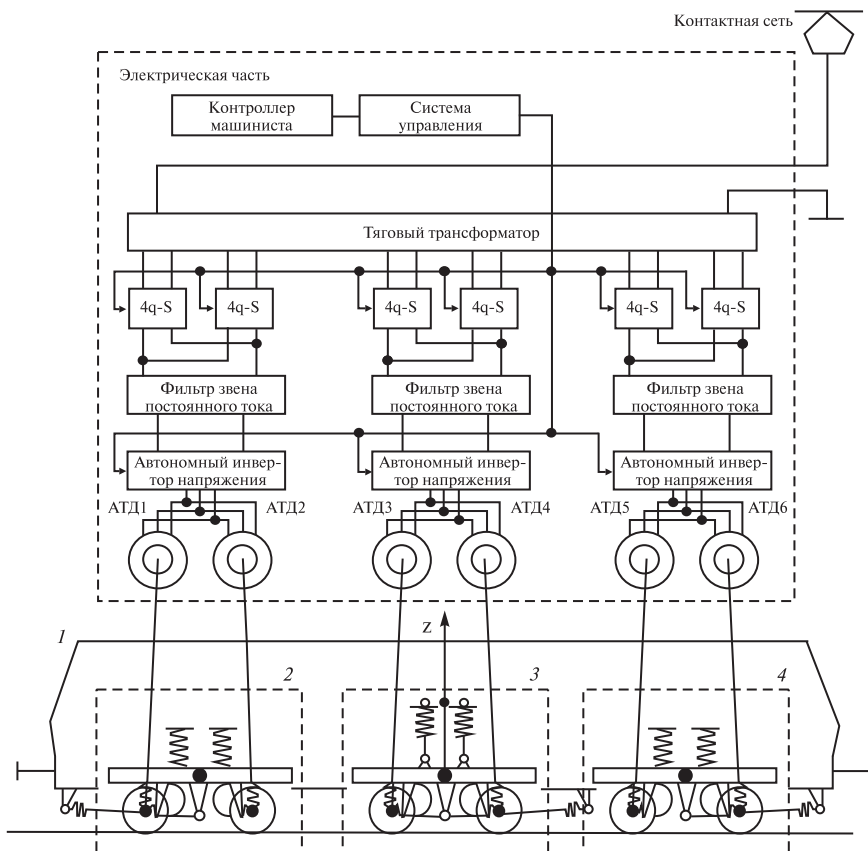


Рис. 6.1. Электровоз с АТП как управляемая электромеханическая система:
1 — кузов; 2, 3, 4 — тележки

- анализ поведения локомотива в нестационарных штатных и аварийных режимах, таких как трогание с места, разгон, электрическое (для электровозов также рекуперативное) торможение, потеря питания, отключение при перегрузках по току и др.;
- срыв сцепления в контакте «колесо—рельс» и алгоритмы подавления боксования;
- исследование влияния выбранных принципов и алгоритмов управления на тяговые свойства и энергопотребление локомотива, на работу его электрооборудования;

- взаимодействие экипажа и пути, особенно в связи с необходимостью уменьшения износа профилей колес и рельсов;
- для электровозов — взаимодействие с системой тягового электроснабжения, и т.д.

Существует прямая и обратная связь между процессами в электрических цепях и механической части. Величины моментов на валах асинхронных тяговых двигателей (АТД) входят в правые части уравнений движения (см. ниже уравнения (6.1)), тогда как угловые скорости вращения колесных пар включены в систему уравнений (6.2), определяющих процессы в электрических цепях.

6.1.2. Модель механической части

Механическая часть электровоза, представленная в виде системы подвижно соединенных твердых тел, состоит из кузова и трех двухосных тележек (рис. 6.1 и 6.2). Тяговые и тормозные усилия передаются от рам тележек на кузов при помощи наклонных тяг. Для электровоза ЭП10, имеющего колесную формулу 2о-2о-2о и механический тяговый привод второго класса, модель механической части содержит 28 твердых тел. Для других локомотивов число тел будет другим.

Поскольку электровоз имеет одинаковые тележки, при моделировании эффективен «метод подсистем». Граф механической системы может быть представлен состоящим из десяти подсистем: «Кузов» с шестью степенями свободы, три подсистемы «Тележка» с восемью степенями свободы и шесть подсистем «Тяговый редук-

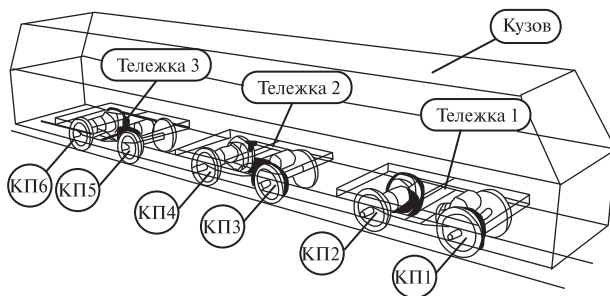


Рис. 6.2. Механическая часть электровоза как система твердых тел:
КП1—КП6 — колесные пары

тор — колесная пара» с восемью степенями свободы. Общее число степеней свободы электровоза ЭП10 равно 78.

Уравнения движения получены при помощи формального метода Ньютона—Эйлера:

$$M(q)\ddot{q} + k(q, \dot{q}) = Q(q, \dot{q}) + G(q)^T \lambda, \quad g(q) = 0, \quad (6.1)$$

где q , $\dot{q}$, $\ddot{q}$ — матрицы-столбцы лагранжевых координат, скоростей и ускорений;

M — матрица масс;

k , Q — матрицы-столбцы гироскопических и активных сил;

λ — вектор множителей Лагранжа, соответствующих разрезанным связям;

g — уравнения связей;

m — число связей;

$$G = \partial g / \partial q^T = \left\{ \partial g_i / \partial q_j \right\}_{i=1, m}^{j=1, n} \text{ — якобиан уравнений связей.}$$

Уравнения (6.1) представляют собой систему дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ). В результате их решения определяются координаты $q(t)$ и множители Лагранжа $\lambda(t)$.

Компьютерное моделирование динамики электровоза ЭП10 (рис. 6.3) выполнено при помощи программного комплекса «Универсальный механизм» (www.umlalab.ru) с подключением модулей, воспроизводящих процессы в электрических цепях и системе управления. Структура модели полностью соответствует рис. 6.1 и 6.2.

Программный комплекс «Универсальный механизм» (УМ) предназначен для автоматизации процесса исследования механических объектов, которые могут быть представлены системой абсолютно твердых тел, связанных посредством кинематических и силовых элементов (СТТ). В конфигурации «УМ-Локо» программный комплекс имеет развитую программную среду, предназначенную для моделирования динамики рельсовых экипажей: локомотивов, вагонов и путевых машин.

Использование при моделировании лишь абсолютно твердых тел, конечно, накладывает опреде-

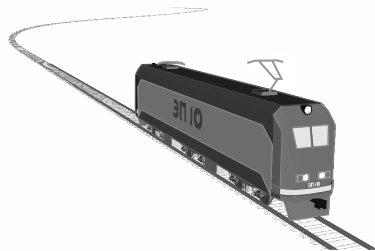


Рис. 6.3. Моделирование движения электровоза ЭП10 в пакете «УМ-Локо»

ленные ограничения на класс задач, которые могут быть решены с помощью «УМ», но этот класс достаточно велик по объему. Фактически возможности комплекса распространяются на большую часть систем, являющихся объектом применения методов теоретической и прикладной механики. Механическая система может быть как плоской, так и пространственной. Практически отсутствуют ограничения на число тел в системе.

После определения динамических нагрузок в рамках СТТ можно рассматривать интересующее нас тело (например, кузов) как упругое, находящееся под действием этих сил, и перейти к анализу вопросов прочности — такой подход был применен в гл. 5.

При вычислении сил крипа в контакте «колесо—рельс» применен алгоритм FASTSIM, модифицированный для случая нестационарного контакта, что позволило получить значение силы тяги при трогании с места (когда скорость локомотива равна нулю) и решение для случая возникновения боксования.

При моделировании учитывается как макрогеометрия участка, по которому движется локомотив (вертикальный профиль и план пути), так и наличие вертикальных и горизонтальных микронеровностей рельсовых нитей. Принимается во внимание также наличие износа рабочих поверхностей колес и рельсов.

Полноразмерная модель механической части позволяет учитывать перераспределение нагрузки между осями локомотива в режимах тяги и торможения, исследовать взаимодействие в боковом контакте колеса и рельса при прохождении кривых, что особенно важно для горных участков, и т.д.

6.1.3. Модель электрической части

Система преобразования энергии моделируется методами теории цепей. При питании от сети переменного тока эта система состоит из тягового трансформатора, входных 4q-S-преобразователей, звена постоянного тока (фильтра), автономных инверторов напряжения (АИН) для питания АТД (см. рис. 6.1). Модель учитывает, что тяговые приводы всех шести осей питаются от одного тягового трансформатора.

Принципиальная схема силовых цепей одной тележки электроваза в этом случае показана на рис. 6.4. Два 4q-S-преобразователя, подключенных ко вторичной обмотке тягового трансформатора (ТТр), работают параллельно на фильтр звена постоянного тока.

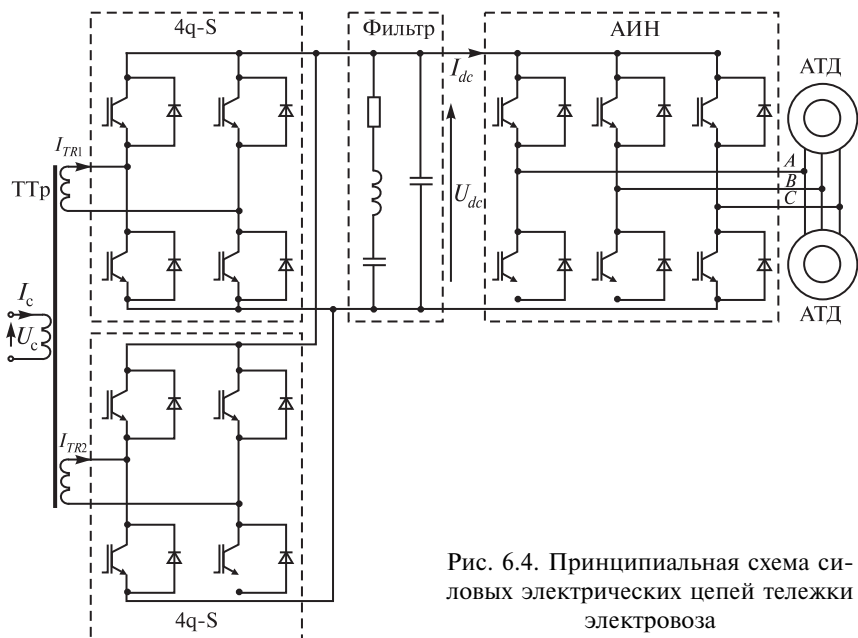


Рис. 6.4. Принципиальная схема силовых электрических цепей тележки электровоза

АИН является нагрузкой звена постоянного тока и питает два АТД одной тележки.

Дифференциально-алгебраические уравнения процессов в силовых цепях основаны на законах Кирхгофа. Они формируются автоматически в следующем виде:

$$f(x_{n+1}, \dot{x}_{n+1}, t_{n+1}) = 0, \quad (6.2)$$

где x_{n+1} — переменная состояния электрической цепи во временной точке t_{n+1} .

Решение уравнений (6.2) выполняется при помощи формулы численного дифференцирования назад (BDF — backward differentiation formula):

$$h(x_{n+1}) = \dot{x}_{n+1} = -\frac{1}{\Delta t} \sum_{i=0}^k \alpha_i x_{n+1-i},$$

где α_i — коэффициенты BDF,
 Δt — шаг по времени.

Подстановка этой формулы в (6.2) дает:

$$x_{n+1}^{(j+1)} = x_{n+1}^{(j)} - \left[J(x_{n+1}^{(j)})^{-1} f(x_{n+1}^{(j)}, g_{n+1}^{(j)}, t_{n+1}) \right].$$

Матрица Якоби для функции $f(x_{n+1}, g(x_{n+1}), t_{n+1})$ при $x_{n+1} = x_{n+1}^{(j)}$ выражается следующим образом:

$$J(x_{n+1}^{(j)}) = \frac{\partial f(x, \dot{x}, t)}{\partial x} \bigg|_{\substack{x=x_{n+1}^{(j)} \\ \dot{x}=g(x_{n+1}^{(j)})}} - \frac{\alpha_0}{h} \frac{\partial f(x, \dot{x}, t)}{\partial \dot{x}} \bigg|_{\substack{x=x_{n+1}^{(j)} \\ \dot{x}=g(x_{n+1}^{(j)})}}.$$

Тяговые характеристики электровоза в значительной степени определяются структурой, принципами и алгоритмами системы управления тяговым приводом, которая будет рассмотрена ниже.

Преобразование электромагнитной энергии в механическую происходит в асинхронном тяговом двигателе. Электромагнитное состояние АТД определено методами теории поля, расчеты выполнены при помощи метода конечных элементов. Математическая модель учитывает насыщение стали магнитопровода и зубчатость активных слоев статора и ротора, а также смещение тока в их обмотках. Благодаря этому удалось выполнить моделирование различных режимов работы АТД, в том числе стоповых (пусковых) и околостоповых, с требуемой степенью точности.

Модель основана на представлении АТД как системы магнитосвязанных контуров. Уравнения, описывающие электромагнитные процессы в контурах, могут быть записаны следующим образом

$$\dot{\Psi} = U - RI, \quad (6.3)$$

где Ψ — вектор потокосцепления контуров;

U, I — векторы напряжения и тока в контурах;

R — диагональная матрица активных сопротивлений контуров.

Связь между потокосцеплениями и токами в контурах определяется алгебраическими уравнениями

$$\Psi = MI, \quad (6.4)$$

где M — матрица собственных и взаимных индуктивностей контуров.

Уравнения (6.3) и (6.4) описывают процессы в системе, состоящей из магнитосвязанных контуров. Состояние каждого из кон-

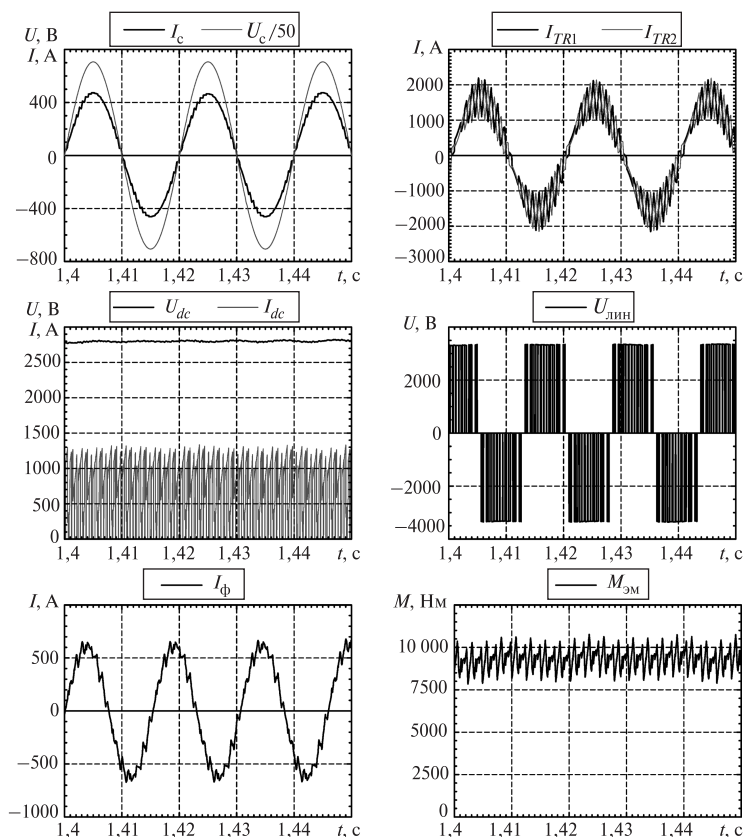


Рис. 6.5. Процессы в силовых цепях тележки электровоза

туров характеризуется двумя величинами — потокосцеплением и током.

Потокосцепление контуров и матрица индуктивностей вычисляются методами теории поля. Согласно допущению, принятому в теории электрических машин, полагаем, что магнитное поле АТД является плоско-параллельным. Особенности магнитной системы электрической машины является то, что она имеет сложную конфигурацию, значительное количество областей с током, а также воздушный зазор. Кроме того, магнитная система является замкнутой; можно считать, что за ее пределами поле отсутствует. В этом случае эффективным является метод конечных элементов.

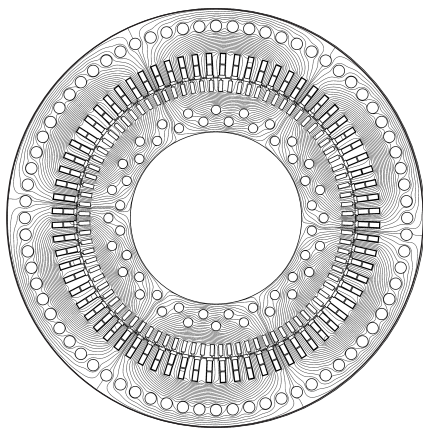


Рис. 6.6. Магнитное поле АТД

На рис. 6.5 представлены результаты моделирования стационарных процессов в силовых цепях одной тележки, где: U_c , I_c — напряжение и ток контактной сети; I_{TR1} , I_{TR2} — входные токи первого и второго 4q-S-преобразователей; U_{dc} — напряжение в звене постоянного тока; I_{dc} — входной ток АИН; $U_{\text{лин}}$ — входное линейное напряжение АИН; I_{ϕ} — ток фазы АТД; $M_{\text{эм}}$ — электромагнитный момент на валу АТД.

Разработанная компьютерная модель АТД НТА-1200 позволяет получить анимационные картины изменения магнитного поля АТД в различных режимах работы, в том числе при трогании с места. На рис. 6.6 показан один из кадров анимации.

6.1.4. Модель системы управления

Автоматические системы управления (АСУ) все в большей степени определяют технический уровень локомотивов и поэтому к ним предъявляется целый ряд специальных требований. Современные АСУ управляют тяговым приводом электровоза, всем силовым и вспомогательным оборудованием, выполняют функции защиты оборудования от перегрузок в аварийных режимах, обеспечивают безопасность движения и выполняют диагностику оборудования. Кроме того, они обеспечивают выполнение ряда интеллектуальных задач: поддерживают постоянное значение скорости движения либо силы тяги, оптимизируют энергозатраты на тягу и др.

Система управления электровоза ЭП10 имеет два уровня. Первый (высший) уровень обеспечивает управление электровозом в целом, второй — управление асинхронным тяговым приводом (см. гл. 4).

На первом уровне осуществляются сбор и обработка информации о состоянии электровоза, вырабатываются команды управле-

ния (отрабатываются алгоритмы режимов тяги, стабилизации скорости, торможения, алгоритмы управления вспомогательным приводом и др.).

На втором уровне отрабатываются команды, поступившие с первого уровня, и формируются управляющие сигналы на систему питания АТД. Регулирование момента АТД должно обеспечивать отсутствие низкочастотных пульсаций во всех режимах работы, его быстродействие должно быть достаточным для предотвращения боксования колесных пар.

Проведенный анализ показал, что система векторного управления обеспечивает наилучшие показатели работы АТД. При этом потокосцепление ротора поддерживается постоянным за счет изменения величины тока статора. Поэтому в модели реализована двухканальная четырехконтурная система управления АТД с независимым регулированием потокосцепления и момента (см. гл. 4).

6.1.5. Результаты моделирования

Результаты проверки адекватности предлагаемой компьютерной модели по результатам эксплуатационных испытаний электровоза ЭП10, а также стендовых испытаний его оборудования, подтвердили правильность выбранной стратегии построения модели, эффективность использованного математического аппарата и приемлемость принятых допущений.

С помощью модели была выполнена комплексная оценка различных вариантов алгоритмов управления, оценено их влияние на функционирование устройств преобразования энергии и АТД, проведен анализ электромеханических процессов в различных режимах работы.

Ниже приведены примеры использования модели для изучения конкретных режимов движения.

Движение по прямой в режиме тяги. В качестве первого примера использования разработанной модели электромеханической системы электровоза, алгоритмов и принципов функционирования системы управления выполнен расчет электромеханических процессов при движении электровоза ЭП10 в режиме тяги.

Расчеты выполнены для случая, когда электровоз движется с постоянной скоростью около 80 км/ч (22 м/с), близкой к номинальной, по прямолинейному горизонтальному участку пути, имеющему микронеровности рельсовых нитей в вертикальной и

горизонтальной плоскостях согласно РД 32.68—96. Максимальное значение коэффициента сцепления принято равным 0,25.

Питание осуществляется от контактной сети переменного тока. Электрическая часть АТЭП моделировалась в соответствии со схемой, приведенной на рис. 6.4. Для формирования выходного напряжения АИН используется описанная в гл. 4 пространственно-векторная ШИМ (частота модуляции 1500 Гц). В системе управления реализован принцип регулирования АТД с автоматическим поддержанием постоянства потокосцепления ротора. Структура системы управления и параметры ее быстродействия соответствуют приведенным в гл. 4.

Задание потокосцепления принято равным 3,8 Вб, задание момента — 8000 Н·м, что соответствует работе на пределе по сцеплению.

Результаты моделирования процессов при указанных параметрах управления показаны на рис. 6.7—6.9.

На рис. 6.7 приведены графики электромагнитных моментов на валах АТД передней тележки ($M_{эм1}$ и $M_{эм2}$), моментов после резинокордной муфты ($M_{муф1}$ и $M_{муф2}$), частот вращения роторов ($\omega_{р1}$ и $\omega_{р2}$) и приведенных к ротору частот вращения колесных пар ($\omega_{к1}$ и $\omega_{к2}$). Соответствующие результаты для средней и задней тележек электровоза также получены, но здесь не приводятся.

Частоты вращения роторов АТД имеют колебания относительно среднего значения, что объясняется эффектом планетарного редуктора, имеющем место в случае применения тягового привода второго класса. Эти колебания являются возмущающим воздействием для САР асинхронным тяговым приводом. Параметры быстродействия системы управления, определенные в гл. 4, позволяют полностью компенсировать эти возмущения, обеспечить устойчивость САР и хорошее качество регулирования.

Как видно из приведенных результатов, высокочастотные пульсации электромагнитного момента на валу АТД, возникающие как следствие питания от АИН, практически полностью поглощаются резинокордной муфтой. Имеющие место низкочастотные колебания момента объясняются динамическими процессами в механической части электровоза, которые являются следствием воздействия неровностей путевой структуры.

На рис. 6.8 показаны графики сил нажатия колес на рельсы (вертикальных усилий в контакте «колесо—рельс») первой ($F_{z1л}$,

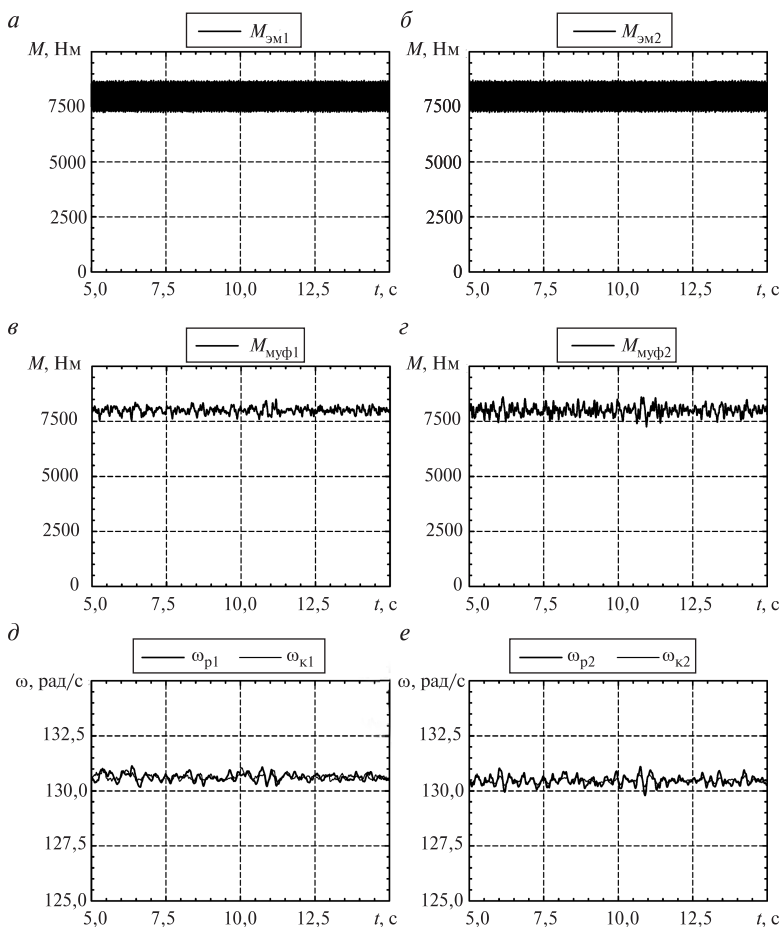


Рис. 6.7. Динамические процессы при движении по прямой в режиме тяги: а, б — моменты на валах АТД; в, г — то же после резинокордных муфт; д, е — частоты вращения роторов АТД и колесных пар передней тележки

$F_{z1п}$) и второй ($F_{z2л}$, $F_{z2п}$) колесных пар передней тележки. Также на этом рисунке приведены силы тяги левых и правых колес ($F_{x1л}$, $F_{x1п}$, $F_{x2л}$, $F_{x2п}$) этих колесных пар.

Можно отметить разницу в давлениях левого и правого колес одной и той же колесной пары на рельсы, что связано с асимметричным расположением редукторов (см. гл. 5). В результате

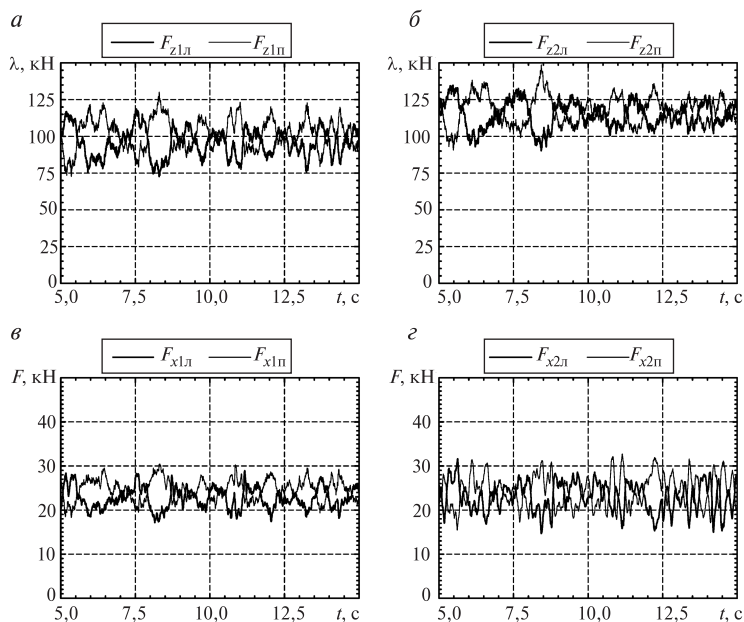


Рис. 6.8. Динамические процессы при движении в прямой в режиме тяги:
 а, б — усилия в контакте «колесо—рельс» колесных пар первой тележки;
 в, г — сила тяги левых и правых колес этих колесных пар

действия активных моментов на валах АТД и взаимодействия элементов механической части электровоза первая по движению КП разгружена, вторая — догружена. Поэтому, как видно из приведенных на рис. 6.7 графиков, частота вращения первой КП больше, чем второй. Это свидетельствует о том, что первая КП работает с большим, приближающимся к критическому, скольжением. Как показали результаты предварительных расчетов, разница в давлениях от КП на рельс для одной тележки увеличивается с ростом момента и может достигать 10—15 % от статической нагрузки. Наиболее разгруженной является первая по движению КП электровоза. Она является лимитирующей с точки зрения использования условий сцепления. В результате динамических процессов, возникающих при движении по пути неровностями, нагрузка от колесных пар на рельсы и, как следствие, их сила тяги имеют

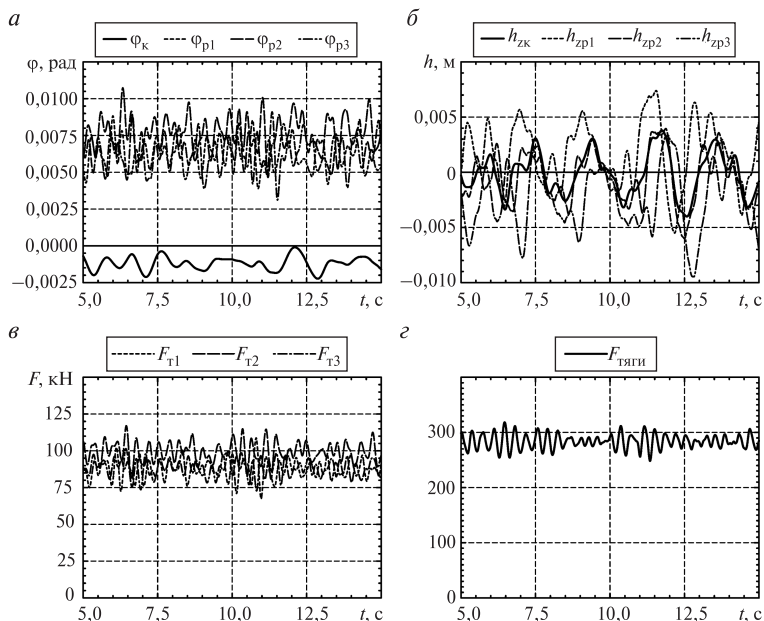


Рис. 6.9. Динамические процессы при движении в прямой в режиме тяги: *а* — галопирование; *б* — подпрыгивание кузова и тележек; *в* — усилия в наклонных тягах; *г* — сила тяги электровоза

колебания, величина которых может достигать 20—25 % от среднего значения этих сил.

На рис. 6.9 показаны графики галопирования кузова (φ_k) и тележек (φ_{p1} , φ_{p2} , φ_{p3}), подпрыгивания (перемещение в вертикальном направлении относительно положения статического равновесия) кузова и тележек (h_{zk} , h_{zp1} , h_{zp2} , h_{zp3}), усилий в наклонных тягах (F_{T1} , F_{T2} , F_{T3}) и силы тяги электровоза ($F_{тяги}$).

Как показал анализ полных результатов расчетов, на динамическое распределение давлений от колесных пар на рельсы оказывают влияние все виды колебаний кузова и тележек — не только подпрыгивание и галопирование, но и боковая качка, влияние и боковой относ.

Усилия в наклонных тягах имеют колебания около 20 % от среднего значения, причиной которых являются пульсации сил тяги

в контактах «колесо—рельс» и взаимные перемещения элементов механической части. Инерция кузова и взаимное наложение этих колебаний для трех наклонных тяг сглаживают пульсации полной силы тяги электровоза.

Кроме приведенных результатов, в зависимости от целей и задач исследований также могут быть выведены в виде графиков угловые и линейные перемещения любых элементов механической части электровоза, силы в пружинах, гасителях колебаний, в буксовых поводках, токи и напряжения в элементах системы преобразования электроэнергии, тяговых двигателей, переменные состояния системы управления и т.д.

Движение в кривой в режиме тяги. В качестве второго примера использования разработанной модели выполнен расчет электро-механической системы при движении электровоза ЭП10 в кривой в режиме тяги. Все параметры электрической части и системы управления соответствуют принятым выше.

Расчеты выполнены для случая, когда электровоз движется с постоянной скоростью около 80 км/ч (22 м/с) в правой кривой радиуса 300 м при возвышении наружного рельса $h = 100$ мм, что соответствует значению непогашенного ускорения $+0,99 \text{ м/с}^2$.

Длина переходной кривой составляет 100 м, длина дуги постоянного радиуса — 300 м. Микронеровности рельсовых нитей в вертикальной и горизонтальной плоскостях приняты согласно РД 32.68—96. Максимальное значение коэффициента сцепления равно 0,25.

На рис. 6.10 показаны графики тяговых моментов после резиноcordной муфты на первой и второй осях передней тележки, а на рис. 6.11 — графики нажатий колес на рельсы для первой и второй осей передней тележки. Как видно, на наружном рельсе нажатие практически в 2 раза больше, чем на внутреннем.

На рис. 6.12 приведены графики сил тяги для наружных и внутренних колес первой и второй осей передней тележки, где разница также практически двукратная. Это явление объясняется не только тем, что нажатие левого и правого колес разные, но и избыточным скольжением для внутреннего колеса и недостаточным для внутреннего.

На рис. 6.13 показаны суммарные поперечные усилия на левом и правом колесах первой и второй осей передней тележки. Эти

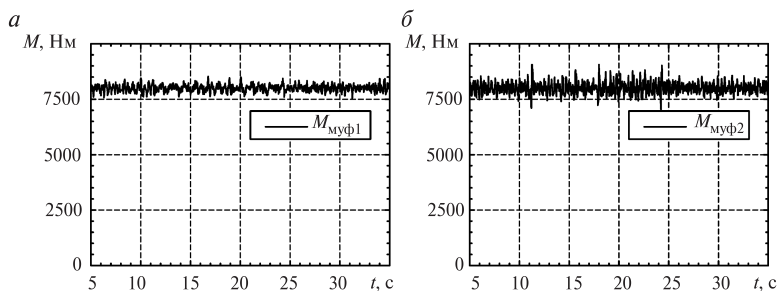


Рис. 6.10. Динамические процессы при движении в кривой в режиме тяги: моменты после резинокордной муфты на первой (а) и второй (б) осях передней тележки

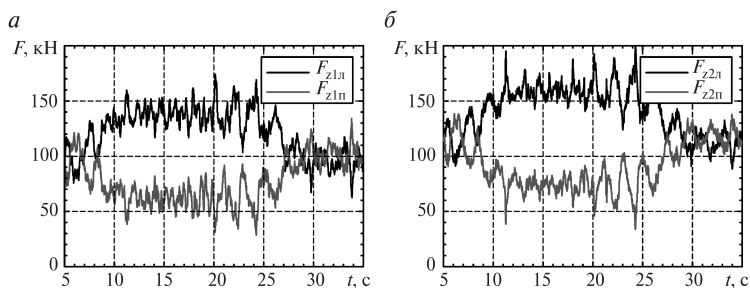


Рис. 6.11. Динамические процессы при движении в кривой в режиме тяги: нажатия колес на рельсы на первой (а) и второй (б) осях передней тележки

усилия включают силы как в основном контакте «колесо—рельс», так и в боковом контакте — между гребнем левого колеса и боковой поверхностью наружного рельса. Как видно из графиков, тележка движется в хордовой установке.

Получены также графики всех усилий в связях механической части.

Трогание с места. Третий пример расчета — электромеханические процессы, возникающие при трогании электровоза с составом с места и разгоне. Это один из самых ответственных режимов работы тягового электропривода. К негативным факторам, оказывающим значительное влияние на работу в этом режиме, относятся неблагоприятный гармонический состав электромагнитного момента АТД и, как следствие, низкочастотные пульсации силы тяги.

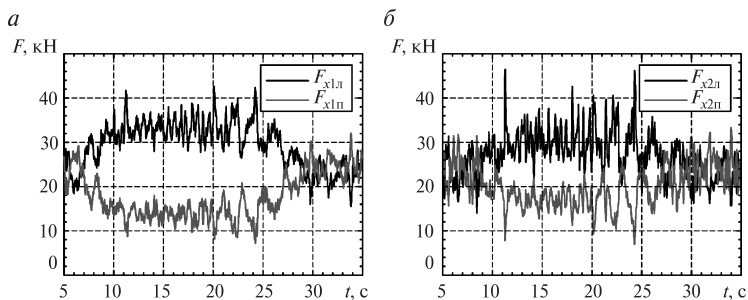


Рис. 6.12. Динамические процессы при движении в кривой в режиме тяги: силы тяги на наружных и внутренних колесах первой (а) и второй (б) осей передней тележки

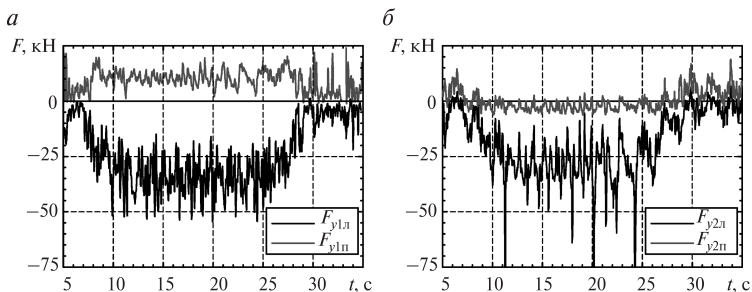


Рис. 6.13. Динамические процессы при движении в кривой в режиме тяги: суммарные поперечные усилия на левых и правых колесах первой (а) и второй (б) осей передней тележки

Значительная магнитная инерционность АТД и имеющиеся ограничения по току и напряжению со стороны инвертора приводят к тому, что одновременное регулирование потокосцепления и момента при большом рассогласовании практически невозможно. Поэтому при пуске электровоза (в течение 0,2 с после получения команды машиниста) система управления устанавливает задание момента равным нулю, что необходимо для завершения переходного процесса регулирования потокосцепления ротора. Затем задание момента увеличивается до требуемой величины с заданной интенсивностью, что позволяет избежать нежелательных явлений в механической части электровоза.

Некоторые из полученных результатов показаны на рис. 6.14, где обозначено: $U_{\text{л}}$ — линейное напряжение АТД; $I_{\text{ф}}$ — ток фазы

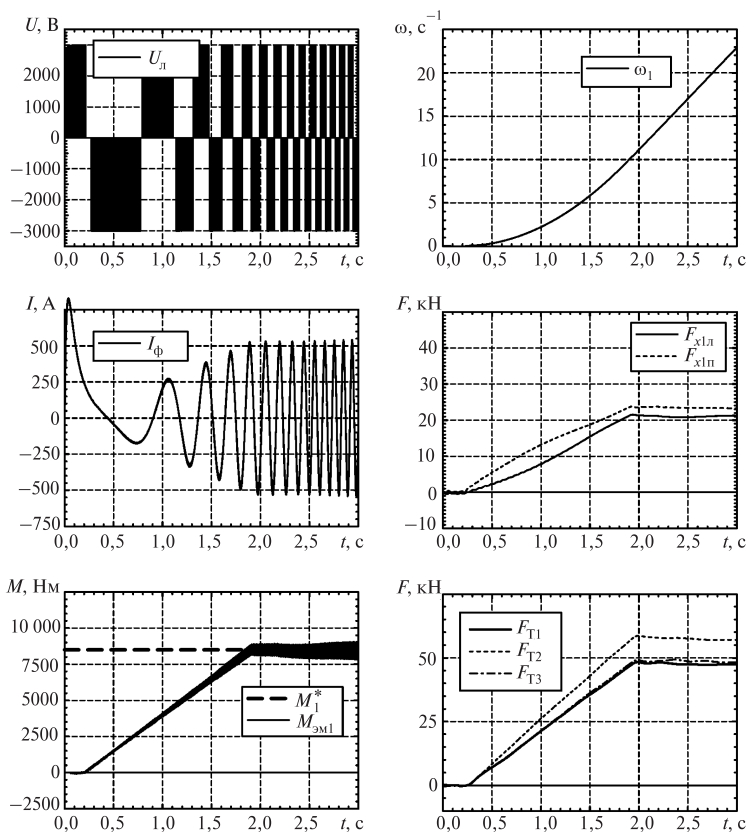


Рис. 6.14. Электромеханические процессы при трогании электровоза с места

АТД; M_1^* , $M_{эм1}$ — задание момента и его действительное значение; ω_1 — угловая скорость вращения ротора первого по ходу АТД; $F_{x1л}$, $F_{x1п}$ — силы тяги левого и правого колес первой по ходу колесной пары; F_{T1} , F_{T2} , F_{T3} — усилия в наклонных тягах.

Анализ результатов показывает, что процесс пуска и разгона электровоза при выбранном алгоритме управления протекает с хорошими динамическими показателями. В целом можно отметить, что качество регулирования остается высоким во всем диапазоне нагрузок и скоростей, начиная от стоповых и околостоповых режимов, вплоть до конструкционной скорости.

Защита от боксования. Работа тягового электропривода на пределе по сцеплению связана с повышенной вероятностью возникновения боксования. Поэтому надежность системы защиты от боксования во многом определяет эффективность управления с точки зрения наиболее полного использования сцепного веса. В процессе исследований было установлено, что для эффективного подавления боксования необходимо снижение электромагнитного момента на валу АТД, причем быстрота его изменения должна быть такой, чтобы исключить колебания и ударные нагрузки в механической части тягового электропривода.

В качестве примера функционирования системы защиты от боксования выполнен расчет процессов при прохождении участка пути с ухудшенными условиями сцепления, длина которого превышает расстояние между крайними колесными парами. При этом учитывались вертикальные и горизонтальные неровности путевой структуры.

Результаты моделирования при скорости движения электровоза 80 км/ч для первой по ходу колесной пары показаны на рис. 6.15, где обозначено: $\psi_{\text{КП1}}$ — коэффициент сцепления в контакте «колесо—рельс» первой по ходу колесной пары; $M_{\text{эм1}}$ — электромагнитный момент АТД; ω_{r1} , ω_{w1} — угловые скорости ротора АТД и колесной пары (умноженной на передаточное отношение тягового редуктора); $F_{x1л}$, $F_{x1п}$ — силы тяги левого и правого колес; F_{T1} , F_{T2} , F_{T3} — усилия в наклонных тягах первой, второй и третьей тележек.

Как видно из приведенных результатов, при движении электровоза на участке с нормальными условиями сцепления колесная пара работает в пределах продуктивной ветви характеристики сцепления. Затем, при снижении коэффициента сцепления начинает развиваться процесс боксования. По мере ухудшения условий сцепления система управления поэтапно снижает моменты на валах АТД и возникшее боксование подавляется. После проезда участка с ухудшенными условиями сцепления система управления восстанавливает заданное значение момента.

Следовательно, реализованные в математической модели принципы построения системы управления позволяют обеспечить хорошее, близкое к предельному использование сцепного веса электровоза.

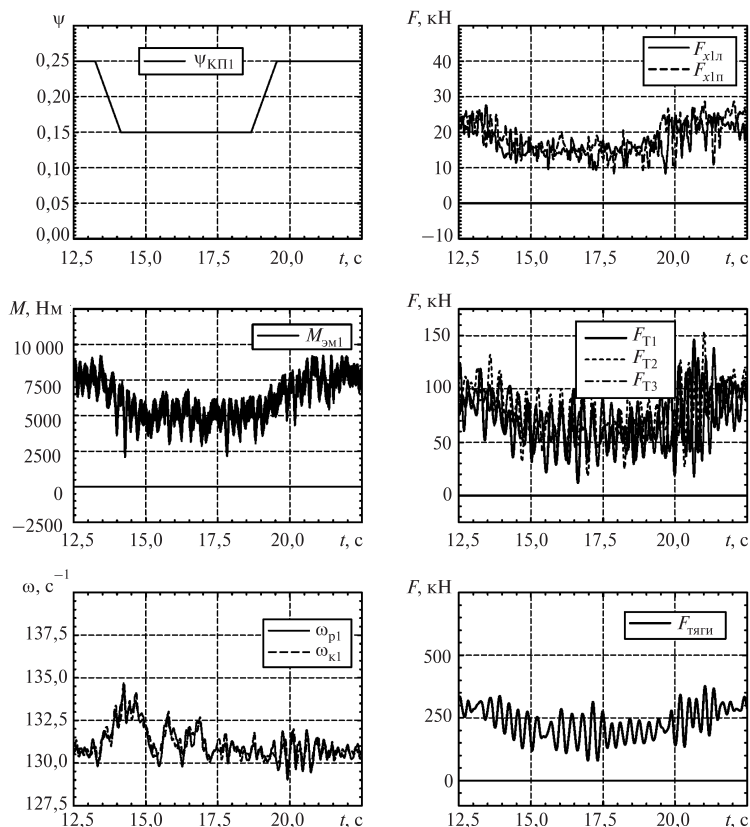


Рис. 6.15. Прохождение участка с ухудшенными условиями сцепления

Подводя итог, отметим, что исходный принцип рассмотрения локомотива как единой управляемой электромеханической системы позволил создать комплексную компьютерную модель, при помощи которой выполнено исследование штатных и аварийных режимов, возникающих в процессе эксплуатации локомотива с АТП при различных алгоритмах управления. Адекватность модели подтверждена результатами изучения наиболее сложных режимов работы электровоза ЭП10.

Созданное программное обеспечение используется на уровне проектных проработок новых конструкций локомотивов с АТП.

6.2. Испытания асинхронного тягового привода

6.2.1. Программы и методы испытания асинхронных тяговых двигателей

Тяговые двигатели, в том числе асинхронные, подвергаются следующим видам испытаний: типовые (квалификационные), серийные (приемо-сдаточные) и исследовательские (специальные).

Квалификационные испытания проводятся с целью определения номинальных характеристик новых типов двигателей. Желательно, чтобы они проводились при питании от того преобразователя, с которым двигатель будет работать в эксплуатации и с использованием тех же способов регулирования питающего напряжения. Квалификационным испытаниям подвергаются опытные двигатели или двигатели опытной партии.

Приемо-сдаточные испытания выполняются для проверки правильности изготовления двигателя и пригоден ли он по состоянию электрических и механических показателей к эксплуатации. Приемо-сдаточным испытаниям подвергается каждый изготовленный или прошедший ремонт двигатель.

Исследовательские испытания предназначены для получения дополнительной специальной информации для поиска путей оценки эффективности работ по совершенствованию двигателей, определения надежности отдельных узлов, совершенствования алгоритмов управления и т.д.

Программа и последовательность *квалификационных испытаний* асинхронных тяговых двигателей следующие:

1. Определение зависимости статического давления охлаждающего воздуха за входом в двигатель от расхода продуваемого через него воздуха (для двигателей с независимой вентиляцией).
2. Определение направления вращения ротора.
3. Измерение сопротивления изоляции относительно корпуса и между обмотками в практически холодном состоянии.
4. Измерение сопротивления фазных обмоток статора постоянному току в практически холодном состоянии.
5. Испытание на нагревание при продолжительной, часовой или другой кратковременной номинальной мощности.
6. Испытание на кратковременную перегрузку по току в режиме короткого замыкания.

7. Испытания при повышенной частоте вращения.
8. Испытания электрической прочности междувитковой изоляции обмотки статора.
9. Измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса и между обмотками.
10. Испытания электрической прочности изоляции обмоток относительно корпуса и между обмотками.
11. Определение тока и потерь холостого хода при номинальных частоте тока статора и напряжении.
12. Определение тока статора и потерь в режиме короткого замыкания при номинальной частоте тока статора и напряжении, обеспечивающем ток статора, не превышающий более чем на 10 % номинальный.
13. Определение тока, потерь и коэффициента мощности холостого хода для частоты тока статора от 10 до 100 % максимальной частоты при изменении линейного напряжения от 1,2 до 0,2 номинального значения.
14. Определение рабочих характеристик, представляющих зависимость от частоты вращения мощности, тока статора, вращающего момента, коэффициента мощности, КПД относительного скольжения.
15. Определение индуктивности обмоток.
16. Испытания на воздействие нижнего значения температуры при эксплуатации.
17. Измерение уровня шума.
18. Измерение уровня радиопомех.
19. Проверка уровня вибрации.
20. Снятие сетки кривых «нагрева—охлаждения» тяговых двигателей с независимой вентиляцией при токах от 40 % номинального до наибольшего допустимого по условиям работы статистического преобразователя и при расходах охлаждающего воздуха, равных 100, 75 и 50 % номинального и без вентиляции.
21. Испытания на вибропрочность.
22. Испытания на влагостойкость.
23. Определение массы.
24. Проверка степени защиты.

Примечание. Испытания по п.п. 9, 10, 11 проводятся на нагретом до рабочей температуры двигателе.

Приемо-сдаточные испытания проводятся по пп. 2—5, 7—12, 19 и программе квалификационных испытаний.

Большинство испытаний проводятся по методикам, определяемым соответствующими ГОСТами, в том числе:

- определение расхода продуваемого воздуха — ГОСТ 12259—75;

- проверка уровня шума — ГОСТ 11929—87;

- определение нагрева — ГОСТ 10159—79, ГОСТ 11828—86 и ГОСТ 7217—87;

- проверка скольжения ГОСТ-183—74;

- определение наибольшей частоты вращения — ГОСТ 11828—86;

- определение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса и электрической прочности изоляции — ГОСТ 11828—86;

- определение коэффициента полезного действия — ГОСТ 25941—83;

- определение коэффициента мощности и вращающего момента — ГОСТ 7217—87;

- определение тока и потерь холостого хода и короткого замыкания, а также на кратковременную перегрузку по току — ГОСТ 11827—77 и ГОСТ 7217—87;

- влагостойкость — ГОСТ 16962.1—89 и ГОСТ 15543.1—89;

- воздействие нижнего значения температуры охлаждающего воздуха — ГОСТ 20.57.406—81 метод 203-1;

- определение степени защиты — ГОСТ 14254—96;

- определение массы — на весах — по ГОСТ 29329—92, динамометром — по ГОСТ 13837—79.

Требования к измерительным приборам и измерениям определяет ГОСТ 11828—86.

Испытания, как правило, проводятся при питании испытываемого двигателя синусоидальным напряжением.

Контрольные значения параметров, которым должен соответствовать испытываемый двигатель, указываются в технических условиях и программах испытаний конкретных типов двигателей.

Испытания должны выполняться в приведенной ниже последовательности.

1. Внешний осмотр. При этом проверяется отсутствие внешних повреждений, тщательность затяжки резьбовых соединений, отсутствие забоин на выступающем конце вала, наличие маркировки обозначений выводов. Оценку качества сборки подшипниковых узлов и состояния подшипников проводят при работе двигателя на холостом ходу с частотой вращения, не превышающей наибольшего значения. В подшипниковых узлах не должно быть ударов, стука, повышенного шума и затираний.

2. Измерение сопротивления изоляции обмотки статора относительно корпуса и между обмотками в холодном состоянии. Измерение проводится при номинальном напряжении до 500 В мегаомметром на 500 В, при напряжении от 500 до 1500 В — мегаомметром 1000 В, свыше 1500 В — мегаомметром на 2500 В.

По окончании измерения сопротивления изоляции обмотку статора следует разрядить путем соединения ее с заземленным корпусом двигателя продолжительностью не менее 15 с.

3. Измерение сопротивления обмотки статора постоянному току в практически холодном состоянии. Температура обмоток определяется термометром и не должна отличаться от температуры окружающего воздуха более чем на ± 3 °С.

Для измерения температуры окружающего воздуха следует расположить на расстоянии 1—2 м от двигателя и на высоте его оси вращения три термометра, защищенных от обдува воздухом и от воздействия посторонних источников тепла. За температуру окружающего воздуха принимается среднее арифметическое показаний этих термометров.

Измерение сопротивления обмоток на постоянном токе производят методом вольтметра и амперметра непосредственно на выводах обмоток по схеме на рис. 6.16.

На рис. 6.16—6.18 приняты следующие обозначения: UVW — обмотка статора испытываемого двигателя; M1 — ротор двигателя; G1 — генератор постоянного тока; GS1 (C1, C2, C3) — генератор синхронный, R1 — резистор; PV1, PV2, PV3, PV4 — вольтметры; PA1, PA2, PA3 — амперметры; PF1 — частотомер; RS1 — шунт измерительный; TT1, TT2, TT3 — трансформаторы тока; TH1, TH2, TH3 — трансформаторы напряжения.

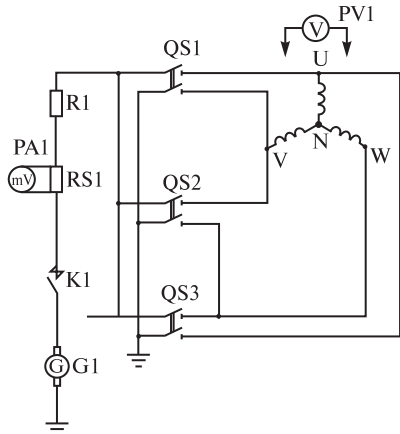


Рис. 6.16. Схема измерения активного сопротивления фазных обмоток статора АТД

Значение постоянного тока при измерении сопротивлений фазных обмоток не должно превышать 15 % от номинального, а время измерения сопротивления обмоток — одну минуту.

Сопротивление фазных обмоток следует измерять между каждой парой выводов, при этом сопротивление фаз рассчитывается по формулам

$$R_u = (R_{31} + R_{12} + R_{23})/2;$$

$$R_v = (R_{12} + R_{23} + R_{31})/2;$$

$$R_w = (R_{31} + R_{23} + R_{12})/2,$$

где R_{31} , R_{12} , R_{23} — сопротивления, измеренные соответственно между выводами U и W, U и V, V и W.

Сопротивление между каждой парой выводов должно быть измерено не менее трех раз при разных значениях постоянного тока. За действительное значение сопротивления принимается среднее арифметическое всех измеренных значений. Результаты измерения одного и того же сопротивления не должны отличаться от среднего значения более чем на $\pm 5\%$.

Измеренное значение сопротивления обмотки статора холодного тягового двигателя для сравнения с расчетной должно быть приведено к температуре 20°C по формуле

$$R_{20} = R_x [1 + \alpha(20 - t)],$$

где R_x — сопротивление обмотки в холодном состоянии;

R_{20} — то же, при температуре 20°C ;

t — температура, при которой производились измерения;

α — температурный коэффициент, зависящий от материала проводника обмотки

$$\alpha = \frac{1}{m + t}.$$

Для обмотки, выполненной из меди, принимают $m = 235$, из алюминия — $m = 245$.

4. Испытания на нагревание в часовом режиме. Нагружение испытываемого двигателя может осуществляться с помощью нагрузочного генератора, включенного на резисторы или по схеме взаимной нагрузки. Метод нагружения двигателя определяется схемой и характеристиками оборудования испытательной станции. При проведении тепловых испытаний на двигателе должны быть установлены все кожухи, сетки, жалюзи, которые могут оказать влияние на величину аэродинамического сопротивления для охлаждающего воздуха.

Испытание на нагревание следует начинать при практически холодном состоянии двигателя. Во время испытания измеряют следующие величины:

- электрические параметры (напряжение линейное, ток, частота, мощность), определяющие режим нагревания машины;
- частоту вращения;
- температуру охлаждающего воздуха в начале теплового режима, через 30 минут и в конце его;
- статическое давление охлаждающего воздуха за входом в двигатель в начале теплового режима при достижении двигателем номинальной частоты вращения.

Превышение температуры статорной обмотки над температурой окружающей среды (τ) следует определять методом сопротивления по формуле

$$\tau = t_{\text{н}} - t_{\text{х}} = \frac{R_{\text{н}} - R_{\text{х}}}{R_{\text{х}}} (m + t_{\text{х}}),$$

где $t_{\text{н}}$ — температура нагрева обмотки;

$t_{\text{х}}$ — температура обмотки в холодном состоянии;

$R_{\text{н}}$ — сопротивление обмотки в нагретом состоянии;

$R_{\text{х}}$ — то же, в холодном состоянии.

Первое измерение сопротивления фазных обмоток производят после остановки двигателя не позднее чем через 40 секунд с момента отключения питания. Сопротивление фазных обмоток следует измерять между каждой парой выводов U–W, U–V и V–W поочередно с промежутком времени между измерениями примерно 20 с (14–16 точек). За результат измерений принимают значение, полученное экстраполяцией на момент отключения. Измерение сопротивления фазных обмоток производят по схеме рис. 6.16.

Превышение температуры обмотки ротора определяется по формуле

$$\tau_p = \frac{s_H - s_X}{s_X} (\alpha + t_X) - (t_H - t_X),$$

где s_H — скольжение в нагретом состоянии при температуре t_H ;

s_X — то же при температуре окружающей среды t_X .

Скольжение определяют с помощью стробоскопа, а температуру подшипников — с помощью термометра.

5. Испытание при повышенной частоте вращения проводят на холостом ходу двигателя, нагретого до рабочей температуры. При этом частоту вращения двигателя с помощью постороннего двигателя или преобразователя с регулируемой частотой питающего напряжения плавно повышают до требуемого значения, указанного в чертеже, выдерживают в течение двух минут и плавно снижают до полной остановки двигателя. Частоту вращения при испытаниях рекомендуется измерять дистанционными методами.

6. Испытание электрической прочности междувитковой изоляции обмоток проводят при работе нагретого до рабочей температуры двигателя на холостом ходу в двигательном режиме. При испытании на обмотку статора в течение пяти минут подают синусоидальное линейное напряжение с частотой 50 Гц и величиной, предусмотренной программой испытаний.

7. Измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса в нагретом до рабочей температуры двигателе производят аналогично тому, как это делалось на холодном двигателе.

8. Испытание электрической прочности изоляции обмоток относительно корпуса проводят на неподвижном нагретом двигателе синусоидальным напряжением частотой 50 Гц. При испытании один вывод источника испытательного напряжения подключают к любому из выводов испытуемого двигателя, а другой — заземляют и подключают к заземленному корпусу двигателя. Источником испытательного напряжения является специальный трансформатор.

Регулирование испытательного напряжения следует производить плавно до величины, указанной в программе. Время, допускаемое для подъема напряжения от половинного значения до полного, должно быть не менее 10 с. Полное испытательное на-

9. Измерение тока статора в режиме холостого хода производят при работе двигателя, не соединенного с нагрузкой, по схеме на рис. 6.17.

U $\odot$ M1 W $\odot$ $\odot$

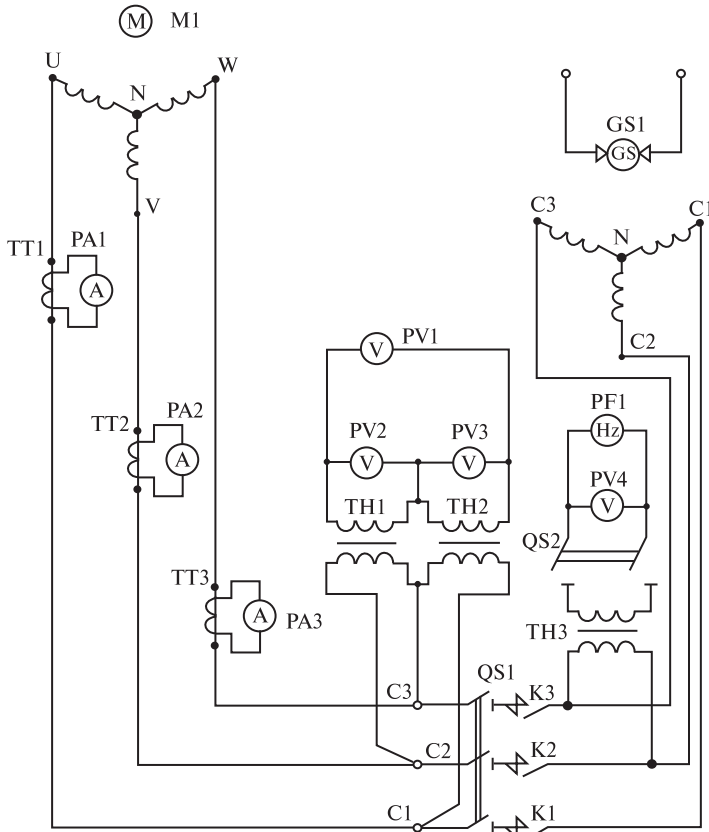


Рис. 6.17. Принципиальная электрическая схема измерения тока статора
в режиме холостого хода

чем диапазоне; значения тока при этом не должно отличаться от расчетного более чем на $\pm 10\%$.

Перед замером тока холостого хода двигатель должен проработать без нагрузки в течение 30 мин. При испытании измеряют линейные напряжения и его частоту, ток в каждой из трех фаз, линейный ток, частоту вращения и подводимую мощность.

За действительное значение линейного напряжения и токов принимается среднее арифметическое всех измеренных значений. По данным опыта холостого хода определяется коэффициент мощности по формуле

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3U_0 I_0}},$$

где U_0 — линейное напряжение холостого хода;

I_0 — линейный ток холостого хода;

P_0 — потери холостого хода.

10. Измерение тока статора в режиме короткого замыкания производят при питании обмотки статора двигателя по схеме рис. 6.17 и заторможенном роторе (рис. 6.18). При этом к статору подводят симметричное напряжение номинальной частоты. Величина напряжения должна быть такой, чтобы ток фазы был близок к номинальному. Полученное при испытании значение тока не должно отличаться более чем на $\pm 5\%$ от расчетного.

Из опыта короткого замыкания определяют пусковой вращающий момент M_K и начальный пусковой ток

$$M_K = \frac{P_{эл}}{n_c},$$

где $P_{эл}$ — электромагнитная мощность;

n_c — синхронная частота вращения.

Начальный пусковой ток ($I_{кн}$) равен току короткого замыкания при номинальном напряжении.

11. Измерение уровня вибрации и испытание на вибропрочность выполняют на специальном стенде, оборудованном виброизмерительной аппаратурой, в двигательном режиме на холостом ходу при номинальной и наибольшей частотах вращения.

Измерение производят на подшипниковых щитах в трех направлениях через 2—3 мин после достижения двигателем требу-

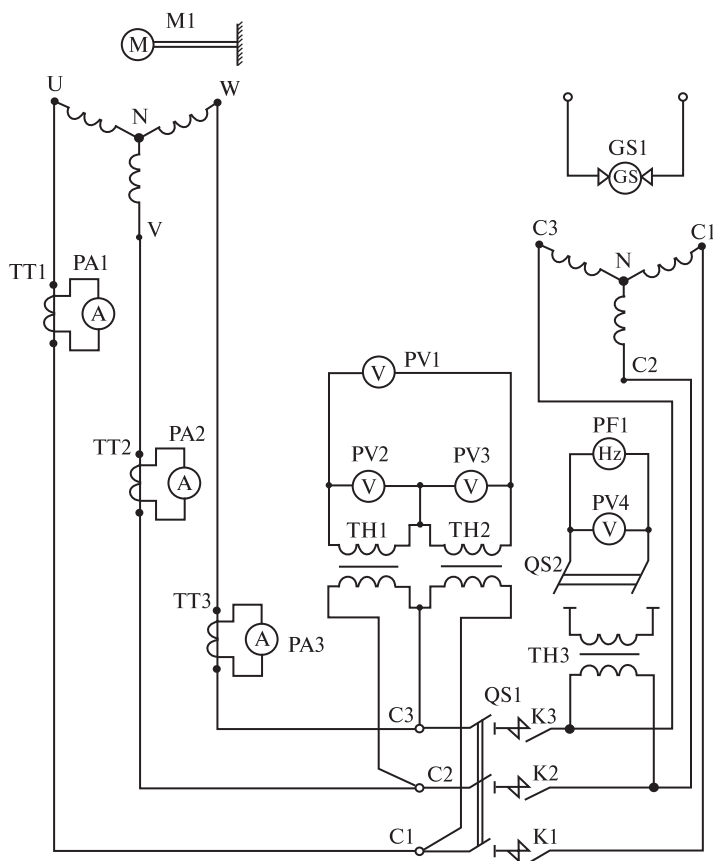


Рис. 6.18. Схема измерения тока статора в режиме короткого замыкания

емых частот вращения. Измерительные приборы должны обеспечить измерение вибрационной скорости от 10 до 10 000 Гц.

Испытания на вибропрочность осуществляют на специальных стендах; крепление двигателя при этом должно быть аналогичным креплению его на локомотиве. Испытания приводят для двигателей с опорно-осевым подвешиванием — в диапазоне частот 10—7000 Гц с виброускорением 120 м/с^2 , для двигателей с опорно-рамным подвешиванием — в диапазоне частот 10—100 Гц и виброускорением 30 м/с^2 .

Продолжительность испытаний — 50 млн циклов. Испытания на вибропрочность в программу приемо-сдаточных не входят.

Для каждого типа тягового двигателя экспериментально определяются рабочие характеристики, под которыми понимают зависимость потребляемой мощности, напряжения, тока, момента, скольжения, КПД и коэффициента мощности от частоты вращения ротора (см. рис. 2.13).

При ступенчатом изменении нагрузок измеряют напряжения, токи, потребляемую мощность, частоты вращения ротора и питающего напряжения. Полученные данные, а также данные, полученные при испытании на холостом ходу и в режиме короткого замыкания, используют для расчета характеристик двигателя.

Коэффициент полезного действия определяют методом полезных потерь

$$\eta = 1 - \frac{\sum P_{\text{п}}}{P_1},$$

где $\sum P_{\text{п}} = P_{\text{м1}} + P_{\text{ст}} + P_{\text{м2}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}$ — мощность потерь;

P_1 — подводимая мощность;

$P_{\text{м1}}$ — потери в обмотке статора: $P_{\text{м1}} = 3I^2 R_{\text{ср}}$;

$R_{\text{ср}}$ — сопротивление фазы обмотки;

I — ток фазы;

$P_{\text{ст}}$ — потери в стали (принимаются независимо от нагрузки и определяются по данным опыта холостого хода);

$P_{\text{м2}}$ — потери в роторе (определяются как $P_{\text{эк}}^s$);

$P_{\text{эк}}$ — электромагнитная мощность (определяется как разность между подводимой мощностью и потерями в статоре);

$P_{\text{мех}}$ — механические потери (принимаются независимо от скольжения и определяются по данным опыта холостого хода);

$P_{\text{доб}}$ — добавочные потери (при номинальной мощности принимаются равными 0,5 % от подводимой мощности, при других нагрузках пересчитываются пропорционально I^2).

Полезная мощность определяется как

$$P_2 = P_1 - \sum P_{\text{п}}.$$

Вращающий момент вычисляется по формуле

$$M = 9,55 \frac{P_2}{n},$$

где n — частота вращения ротора.

Рабочие характеристики асинхронного тягового двигателя желательно определять при питании его от такого же статического преобразователя, который будет питать двигатель на локомотиве. Это обеспечит более точное определение значения ряда эксплуатационных характеристик: КПД, $\cos \phi$, величины нагревов, величины пульсации момента и др.

В этом случае под терминами «напряжение» и «ток» понимают действующие значения основной гармоники. Допускается проводить испытания при питании двигателя симметричным синусоидальным напряжением.

6.2.2. Стенды для испытаний асинхронного тягового привода под нагрузкой

При испытаниях тягового асинхронного привода возможно применение двух схем: непосредственного нагружения и взаимной нагрузки (возвратной работы). В обоих случаях в качестве источника питания статорных обмоток испытываемых двигателей может быть использован генератор синусоидального напряжения либо статический преобразователь частоты. Во втором случае стенд позволяет проводить испытания не только тягового двигателя, но и преобразователя системы привода, а также привода в целом.

Мощность АТД достаточно велика: от 300—350 кВт для электропоездов и маневровых тепловозов до 1600—1800 кВт для магистральных электровозов. Затраты электроэнергии на проведение, например, приемо-сдаточных испытаний двигателей мощностью 1000—1200 кВт составляют более 3000 кВт·ч. Поэтому для снижения энергозатрат на испытания предпочтительнее применять схемы взаимной нагрузки. В этом случае значительная часть электроэнергии, затраченной при испытаниях, возвращается в питающую сеть или используется для питания испытываемого двигателя.

Подчеркнем, что при любой схеме нагружения источники питания должны позволять регулировать амплитуду и частоту выходного напряжения.

При *схеме непосредственного нагружения* испытываемый тяговый двигатель сочленяется, как правило, с генератором постоянного тока, якорь которого включен на нагрузочный резистор. Нагрузка двигателя регулируется изменением величины сопротивления нагрузочного резистора и тока возбуждения нагрузочного генератора. Принципиальная схема непосредственного нагруже-

ния АД при питании синусоидальным напряжением от трехфазного генератора переменного тока показана на рис. 6.19. Частота

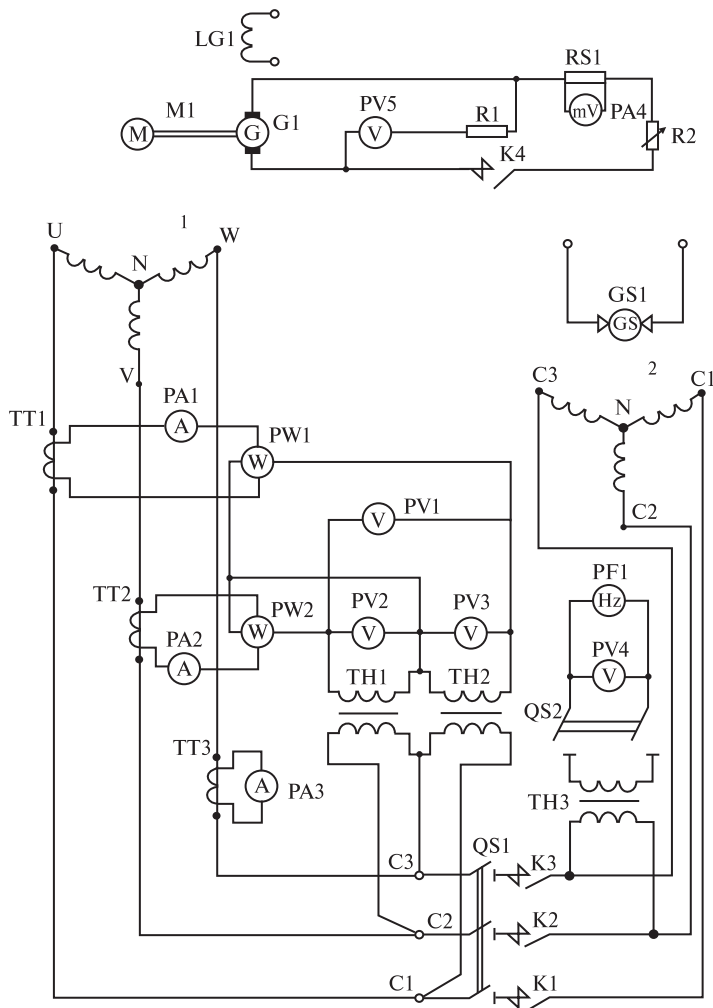


Рис. 6.19. Электрическая схема испытания АД методом непосредственного нагружения при питании синусоидальным напряжением: М — ротор испытываемого АД; UVW — статор испытываемого АД; G — нагрузочный генератор; LG1 — обмотка возбуждения нагрузочного генератора; R2 — регулируемый нагрузочный резистор; GS — ротор синхронного генератора; C1, C2, C3 — статор синхронного генератора

напряжения, питающего испытываемый двигатель, регулируется изменением частоты вращения приводного двигателя генератора, а амплитуда — током возбуждения генератора переменного тока.

Недостатком показанной схемы, кроме большого расхода электроэнергии, является то, что суммарная установленная мощность, используемая в схеме, в 7-8 раз превышает мощность испытываемого двигателя.

Принципиальная схема испытаний асинхронного тягового двигателя по *методу возвратной работы* с вольтодобавочным генератором без согласования с сетью представлена на рис. 6.20.

Испытуемый двигатель 1 механически сочленяется с нагрузочным генератором Г постоянного тока независимого возбуждения 2, который по якорной цепи соединен с первым приводным электродвигателем ЭД независимого возбуждения 3 и вольтодобавочным генератором ВГ 5. Электродвигатель 3 соединен с силовым генератором СГ 4. Вольтодобавочный генератор 5 соединен с электродвигателем 6. Электродвигатель 6 соединен с нагрузочным генератором Г 2. Электродвигатель 3 соединен с силовым генератором СГ 4. Вольтодобавочный генератор 5 соединен с электродвигателем 6. Электродвигатель 6 соединен с нагрузочным генератором Г 2.

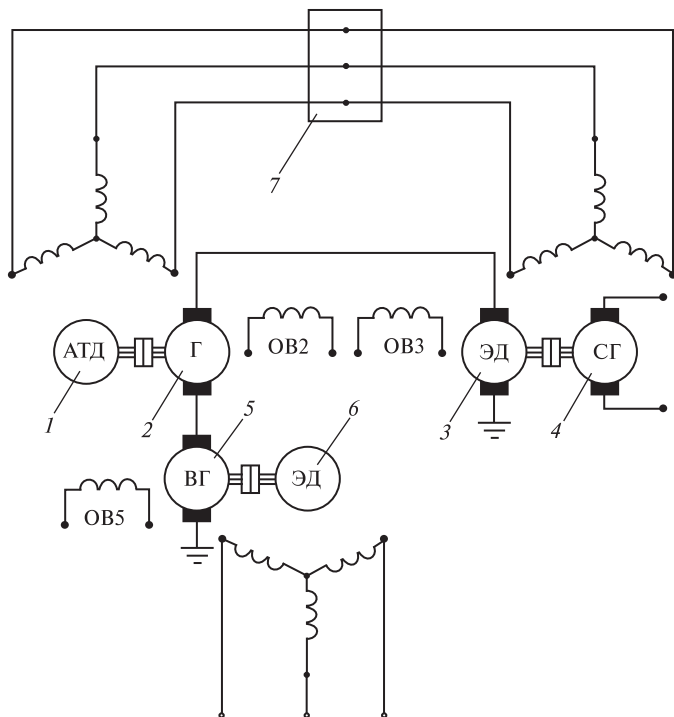


Рис. 6.20. Схема взаимной нагрузки для испытания АТД с компенсацией затрат мощности от вольтодобавочного генератора

вочным генератором ВГ 5. Первый приводной электродвигатель механически соединен с синхронным генератором СГ 4, якорные обмотки которого через электрический контактный узел 7 соединены с фазными статорными обмотками испытуемого АТД.

Схема приводится в работу подачей напряжения на обмотки приводного электродвигателя 6 и последующей подачей напряжения на обмотки возбуждения приводного электродвигателя 3 и вольтодобавочного генератора 5. Приводной электродвигатель 3 приводится во вращение. При подаче напряжения на обмотку возбуждения синхронного генератора 4 на нем появляется напряжение и начинает вращаться испытуемый АТД 1. По мере разгона испытуемого АТД увеличивается потребляемая им мощность и падает частота вращения электродвигателя, а следовательно и частота выходного напряжения СГ 4. Увеличением возбуждения ВГ 5 частота вращения приводного ЭД 3 поднимается до требуемого значения. Включением возбуждения нагрузочного генератора постоянного тока Г 2 с последующим увеличением тока возбуждения от нуля до значения, соответствующего требуемой нагрузке испытуемого АТД, обеспечивается предварительная установка требуемого режима. Окончательная установка заданных параметров режима испытания АТД (частота, напряжение, скольжение и т.д.) обеспечивается регулировкой возбуждения двигателя СГ.

В схеме рис. 6.20 использованы три вспомогательные электрические машины (2, 3 и 4), по мощности равные испытуемому АТД 1, а также агрегат вольтодобавочного генератора 5 с мощностью, необходимой для покрытия потерь в схеме (он должен быть рассчитан на полный ток нагрузочного генератора 2). Установленная мощность схемы в 3,5 раза больше мощности испытываемого двигателя. Однако потребляемая энергия при работе по этой схеме в 4 раза меньше, чем по схеме непосредственной нагрузки.

В схеме рис. 6.21 потери мощности покрываются механическим приводным электродвигателем 5 постоянного тока, сочлененным с приводным электродвигателем 3 и синхронным генератором 4. Для этой схемы установленная мощность также составляет около 3,5 мощности испытываемого АТД.

Для выхода на заданный режим при испытаниях по схеме рис. 6.21 напряжение подается последовательно на обмотку возбуждения и якорную обмотку приводного электродвигателя 5.

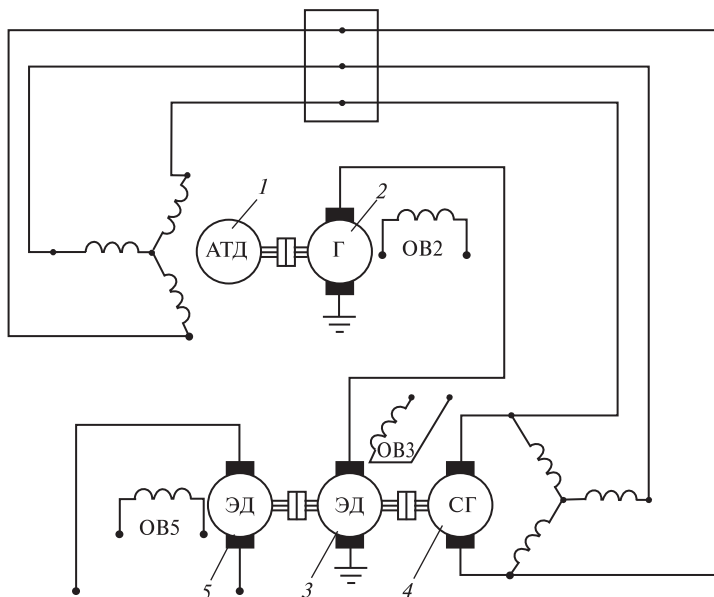


Рис. 6.21. Схема возвратной нагрузки для испытания АТД с покрытием потерь мощности механическим путем

Якорь этого двигателя и механически сочлененные с ним якоря двигателя 3 и синхронного генератора 4 приходят во вращение. Подачей напряжения на обмотку возбуждения синхронного генератора приводится во вращение испытуемый АТД 1. Регулируя возбуждение нагрузочного генератора 2 и приводного двигателя 3, нагружают испытуемый АТД и распределяют нагрузку между двигателями 3 и 5.

Схемы рис. 6.20 и 6.21 предназначены для испытания АТД при питании от источника синусоидального напряжения. Поскольку асинхронные тяговые двигатели предназначены для работы на тяговом подвижном составе (ТПС) при питании от статических преобразователей с несинусоидальной формой выходного напряжения, то некоторые стендовые исследования необходимо проводить при питании от реальных источников напряжения, аналогичных устанавливаемым на ТПС.

В схеме, показанной на рис. 6.22, для испытания АТД используется статический преобразователь частоты и числа фаз (СПЧ).

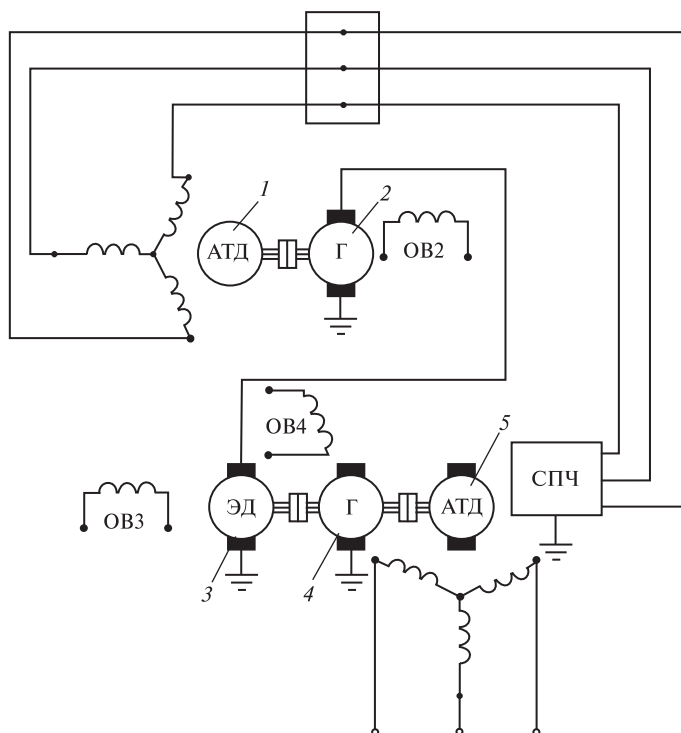


Рис. 6.22. Схема возвратной нагрузки для испытания АТД при питании от статического преобразователя частоты и числа фаз

Ее особенностью является то, что с помощью трехмоторного агрегата, состоящего из генератора постоянного тока 4 и двух приводных двигателей — асинхронного 5 и постоянного тока 3 — не только покрываются потери мощности, но и повышается устойчивость схемы.

Схема работает следующим образом. На приводной двигатель 5 подается напряжение от промышленной сети 50 Гц и он начинает вращаться. Начинают вращаться и соединенные с ним механически генератор 4 и приводной двигатель 3. Подается напряжение на обмотку возбуждения нагрузочного генератора 4. Регулировкой тока возбуждения нагрузочного генератора регулируется напряжение постоянного тока на входе СПЧ. При этом на выходе СПЧ получается трехфазное напряжение, которое можно регулировать

по частоте и амплитуде. Это напряжение подается на статорную обмотку испытуемого АТД 1, который приводит во вращение нагрузочный генератор 2. Нагрузку испытуемого АТД можно регулировать токами возбуждения двигателя 3 и нагрузочных генераторов 2 и 4, а также системой управления СПЧ.

Схема позволяет испытывать АТД под нагрузкой с потреблением от сети около 40 % его мощности.

На рис. 6.23 представлена схема испытания АТД при питании напряжением частотой 50 Гц с возвратом энергии в питающую систему.

Нагружение испытуемого двигателя 1 осуществляется с помощью асинхронного нагрузочного генератора 2, статорная обмотка которого получает питание от синхронного генератора 8. Напряжение от асинхронного генератора поступает на разделительный трансформатор 3 и далее на выпрямитель и инвертор, формирующий переменное напряжение, согласованное по амплитуде, частоте и фазе с напряжением сети. Это согласование обеспечивает

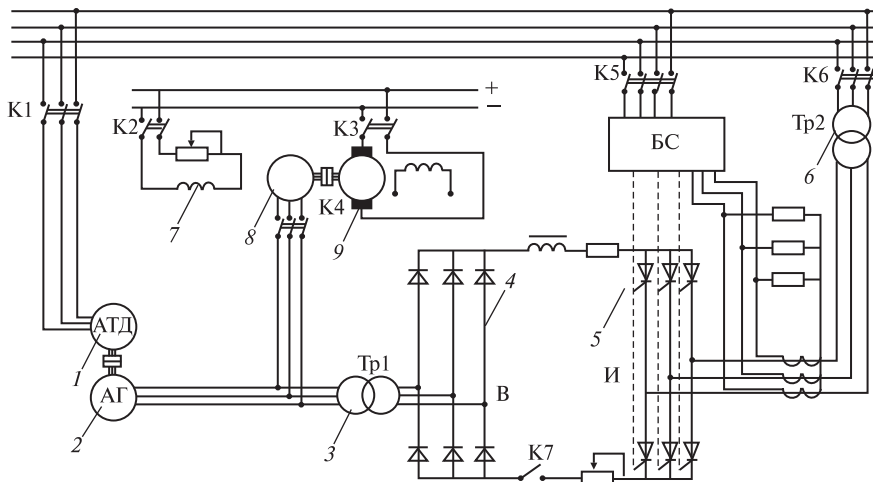


Рис. 6.23. Электрическая схема испытания АТД при питании напряжением с частотой питающей сети и возвратом энергии в сеть: 1 — испытуемый АТД; 2 — асинхронный нагрузочный генератор; 3 и 6 — разделительные трансформаторы; 4 — выпрямитель; 5 — инвертор; 7 — обмотка возбуждения синхронного генератора; 8 — синхронный генератор; 9 — приводной двигатель постоянного тока; БС — блок согласования; K1—K7 — коммутирующие устройства

система управления инвертора и трансформаторов. Установленная мощность схемы составляет около 6,5 от мощности испытываемого АТД. В качестве нагрузочного генератора может быть использован АТД, аналогичный испытываемому.

Кроме метода возвратной работы, для экономии электроэнергии при проведении энергоемких испытаний АТД (например, определение температуры перегрева обмоток и узлов) может быть использован метод моделирования нагрузок. При применении метода моделирования нет необходимости в нагрузочных машинах и устройствах, но требуются специальные источники питания.

Для АТД мощностью свыше 100 кВт ГОСТ 7217—87 допускает проводить такие испытания моделированием: методом двух частот или методом наложения постоянной составляющей. Большинство известных методов моделирования нагрузок асинхронных двигателей требуют, чтобы была выведена нейтральная точка трехфазной обмотки статора.

В качестве примера на рис. 6.24 показана схема моделирования нагружения АТД методом наложения постоянного тока.

Между нейтральными точками статорных обмоток испытываемого АТД 1 и источника питания переменного тока 2 включается

источник постоянного тока с регулируемым напряжением на выходе 3. При включении источника переменного тока испытываемый двигатель начинает работать на холостом ходу с током I_x . При включении источника постоянного тока по обмоткам АТД потечет ток I_{π} . Суммарный ток, эквивалентный по нагреву рабочему, при котором предполагается определить нагрев, будет равен

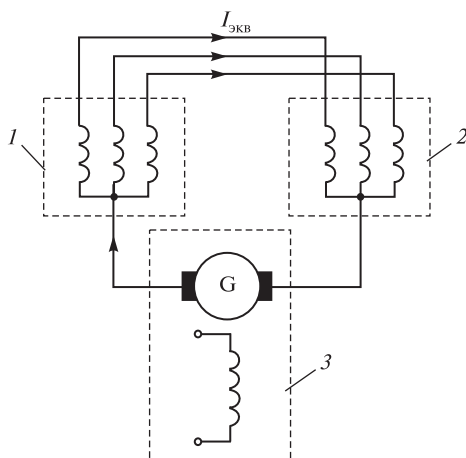


Рис. 6.24. Схема моделирования нагружения АТД методом наложения постоянного тока

$$I_{\text{экр}} = \sqrt{I_x^2 + I_{\pi}^2}.$$

Изменение эквивалентного тока осуществляется регулированием напряжения источника постоянного тока.

Значение эквивалентного тока находится из выражения

$$P_M = 3I_{\text{экв}}^2 r_1 = 3(I_x^2 + I_{\Pi}^2),$$

где P_M — потери в меди статора испытываемого АТД, полученные расчетно или экспериментально;

r_1 — сопротивление фазы статора АТД.

В результате протекания по обмоткам статора постоянного тока создается неподвижное в пространстве магнитное поле. В роторе возникают потери от перемагничивания сердечника при вращении в этом поле и от протекания тока по обмотке. Таким образом, при испытаниях АТД по этой схеме в двигателе имеют место потери в меди статора и ротора, потери в стали и механические потери. Потери в стали, в меди ротора, в меди статора (частично) и механические потери покрываются источником питания переменного тока, а основная часть потерь в меди статора — источником питания постоянного тока.

В качестве источника переменного тока может быть использован синхронный генератор с номинальным напряжением и частотой, равными аналогичным параметрам испытываемого двигателя. Если испытания ведутся при частоте 50 Гц, испытываемый двигатель может быть подключен к переходному трансформатору. Мощность источников питания в этом случае определяется величиной потерь в АТД.

На рис. 6.25 показана функциональная схема станции для комплексного испытания асинхронного тягового привода электровозов.

В связи с тем что асинхронный тяговый привод применяется на электровозах, питающихся от сети как переменного, так и постоянного тока, а применяемые при этом входные преобразователи принципиально отличаются, стенд имеет два ввода напряжения (1 и 2) от различных источников.

На высоковольтный выпрямитель ВВ в наладочном режиме с помощью выключателя QF6 может подаваться напряжение 380 В. Выпрямленное напряжение, называемое далее «имитационная сеть», с ВВ подается на двухпозиционный выключатель QS1 в шкаф ШВА.

Выбор напряжения питания «контактная сеть» или «имитационная сеть» осуществляется с помощью двухпозиционного вык-

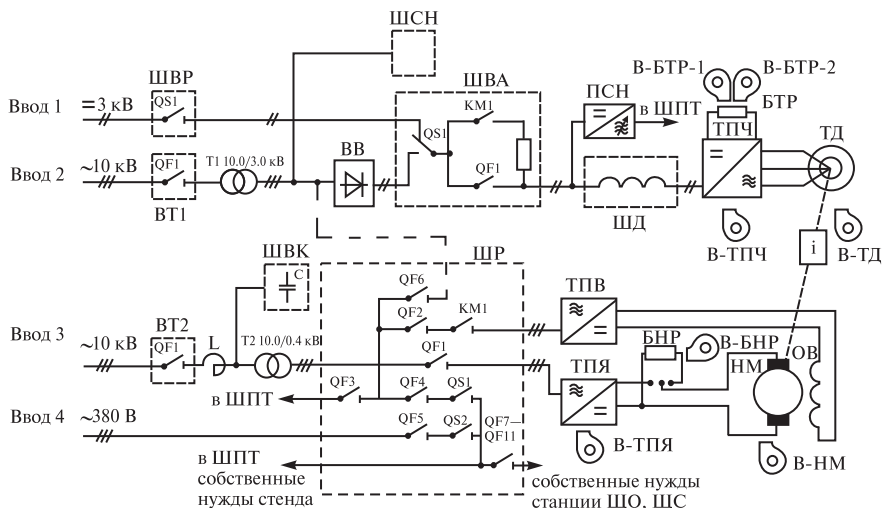


Рис. 6.25. Функциональная схема испытательной станции асинхронного тягового привода электровозов

лючателя QS1 шкафа ШВА. В шкафу ШВА расположен также быстродействующий автоматический выключатель QF1 и контактор заряда фильтровых конденсаторов KM1 с добавочным резистором.

Подача напряжения со шкафа ШВА на тяговый преобразователь частоты ТПЧ осуществляется через входной дроссель, расположенный в шкафу ШД.

ТПЧ формирует трехфазное регулируемое по частоте и амплитуде напряжение, которое подается на испытываемый асинхронный тяговый двигатель ТД.

Стенд обеспечивает следующие режимы работы:

- изменение направления вращения;
- работа в режимах тяги или торможения;
- моделирование боксования при тяге;
- моделирование юза при торможении.

Стенд позволяет проводить испытания при скорости вращения асинхронного электродвигателя от 0 до 1000 об/мин при постоянном моменте и при скорости вращения асинхронного электродвигателя от 1000 до 2680 об/мин при постоянной мощности.

Для создания в исследуемом тяговом электроприводе режима электрического торможения к ТПЧ подключен блок тормозных резисторов БТР.

Охлаждение испытываемого тягового двигателя обеспечивается вентилятором В-ТД. Система охлаждения ТПЧ реализована конструктивно в самом преобразователе и условно показана на функциональной схеме как В-ТПЧ.

От ввода 3 (10) кВ через трансформатор Т2 и от ввода 4 (380 В) напряжение подается на распределительный шкаф ШР и с него:

- на тиристорный преобразователь возбуждения нагрузочной машины ТПВ автоматическим выключателем QF2 и контактором КМ1;

- на тиристорный преобразователь якоря нагрузочной машины ТПЯ автоматическим выключателем QF1.

ТПВ обеспечивает регулируемым выпрямленным током питание обмотки возбуждения ОВ, а ТПЯ обеспечивает регулируемым выпрямленным напряжением якорную цепь нагрузочной машины НМ.

Якорная цепь НМ в зависимости от режима работы может быть подключена либо на блок нагрузочного резистора БНР, либо на вход инвертора ТПЯ, преобразующего постоянное напряжение в трехфазное переменное 50 Гц. В этом случае с помощью трансформатора Т2 через ввод 3 электроэнергия, выработанная нагрузочным генератором, может быть возвращена в энергосистему, питающую стенд.

Механическая часть стенда показана на рис. 6.26. Тяговый асинхронный двигатель 1 и нагрузочная машина 2 жестко соеди-

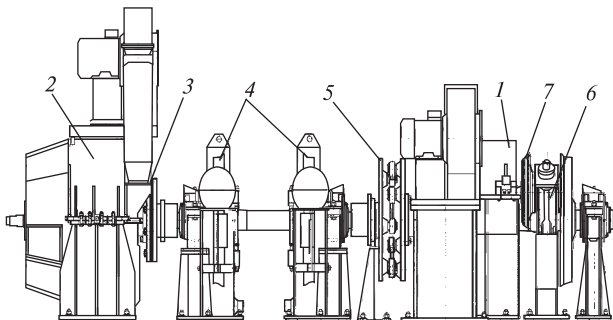


Рис. 6.26. Механическая часть стенда

нены между собой с помощью механической передачи, в состав которой входят:

- колесная пара 4, оснащенная тормозными колодками с пневмоприводом,
- пластинчатая муфта 3, соединяющая вал нагрузочной машины с колесной парой,
- поводковая муфта 5, передающая вращающий момент от колесной пары к входному валу редуктора;
- редуктор 6 для согласования частоты вращения тягового асинхронного двигателя с частотой вращения нагрузочной машины;
- муфта 7, передающая вращающий момент с выходного вала редуктора на вал тягового двигателя.

Общий вид машинного зала испытательного стенда тягового асинхронного электропривода электровозов показан на рис. 6.27, испытания проходит АТД НТА-1200.

На стенде можно испытывать асинхронный тяговый привод в целом, а также отдельные тяговые двигатели, тяговые преобразователи и преобразователи собственных нужд, выполнить отработку алгоритмов систем управления, включая системы защиты от перегрузок, боксования, юза и др.



Рис. 6.27. Общий вид машинного зала испытательной станции

Нагрузочный комплекс обеспечивает регулирование скорости вращения нагрузочной машины с заданным якорным током; работу нагрузочной машины в режиме рекуперативного и реостатного торможения.

Система регулирования преобразователя обеспечивает формирование заданного момента на валу АТД во всем диапазоне изменения частоты вращения.

Для имитации режимов боксования и юза в систему регулирования напряжения на якоре нагрузочной машины введен узел ограничения тока.

Испытательная станция оснащена измерительным комплексом, который предназначен для: опроса всех датчиков нагрузочного комплекса, тягового электропривода и оборудования стенда; отображения полученной информации в цифровом и графическом виде; записи сигналов в файл на жесткий диск измерительного комплекса с возможностью последующей обработки и анализа записанной информации.

Комплекс позволяет осуществлять высокоскоростной обмен данными с максимальной частотой опроса по каждому каналу 1,25 МГц и решать такие задачи, как сбор при непрерывном опросе, обработка (анализ), отображение и сохранение результатов измерений реальных сигналов по 32 входным каналам. Программное обеспечение позволяет создавать лицевую панель интерфейса пользователя и кроме отображения и записи сигналов позволяет производить математические операции с полученными экспериментальными данными (вычисление максимального, минимального, среднего, среднеквадратичного значений сигналов, определение гармонического состава сигналов и т.д.).

**Основные показатели эксплуатационной работы
сети железных дорог России**

№ п/п	Показатели	Годы							
		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	Приведенная работа, млрд т·км	1749,4	1827,9	1984,1	1965,9	2029,6	2128,5	2264,4	
2	Отправлено грузов, млн т	1057,2	1084,3	1160,8	1221,2	1273,0	1310,0	1344,0	
3	Грузооборот, млрд т·км нетто	1433,6	1510,2	1668,9	1801,6	1858,0	1950,8	2090,3	
4	Средняя густота перевозок грузов, млн т·км/км	16,7	17,6	19,5	21,1	21,8	22,9	24,5	
5	Отправлено пассажиров, млн чел.	1305,9	1270,7	1303,5	1335,1	1320,0	1350,0	1278,0	
6	Пассажирооборот, млрд пасс-км	157,9	152,9	157,6	164,3	171,6	177,6	174,1	
7	Средняя густота перевозок пассажи- ров, млн пасс-км/км	1,8	1,8	1,8	1,9	2,0	2,1	2,0	
8	Грузооборот, выполненный магист- ральными электровозами в грузовом движении, млрд т·км брутто	2013,9	2172,1	2457,9	2653,8	2735,6	2868,1	3077,8	
9	Грузооборот, выполненный магист- ральными тепловозами в грузовом движении, млрд т·км брутто	464,4	451,4	461,5	485,7	503,4	531,5	564,9	
10	Удельный вес электрической тяги в освоении грузооборота, %	81,5	82,0	82,0	82,0	80,9	79,4	79,0	
11	Удельный вес тепловозной тяги в освоении грузооборота, %	18,5	18,0	18,0	18,0	19,1	20,6	21,0	
12	Эксплуатационная длина главных путей сети, тыс. км	85,8	85,5	85,4	85,3	85,2	85,2	85,2	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
13	Протяженность путей на тепловозной тяге, тыс. км	44,2	43,2	42,8	42,7	42,3	42,3	42,3
14	Протяженность электрифицированных путей, тыс. км, в том числе: на переменном токе на постоянном токе	41,6 23,0 18,6	42,3 23,8 18,5	42,6 24,1 18,5	42,6 24,2 18,5	42,9 24,4 18,5	42,9 24,5 18,4	42,9 24,5 18,4
15	Электровоз находился в движении, ч/сутки	12,23	12,39	12,52	12,65	12,61	12,70	12,58
16	Тепловоз находился в движении, ч/сутки	10,07	10,12	10,25	10,33	10,51	10,57	10,52
17	Средний вес брутто грузового поезда, т: при электрической тяге при тепловозной тяге	3682 3019	3682 3049	3724 3099	3784 3154	3842 3158	3869 3203	3894 3248
18	Участковая скорость движения грузового поезда, км/ч: при электрической тяге при тепловозной тяге	40,6 33,3	40,0 32,3	40,8 32,6	41,4 33,0	42,2 33,3	42,2 33,8	41,8 34,4
19	Техническая скорость движения грузового поезда, км/ч: при электрической тяге при тепловозной тяге	47,2 41,8	47,0 41,4	48,1 41,8	48,8 42,5	49,9 42,8	50,0 43,5	50,1 44,1
20	Среднесуточный пробег грузового локомотива, км/сутки: при электрической тяге при тепловозной тяге	553,3 400,9	561,2 396,7	580,6 406,3	593,9 414,3	606,2 427,6	612,8 434,4	606,9 435,2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
21	Среднесуточная производительность грузового локомотива, тыс. т·км брутто: при электрической тяге при тепловозной тяге	1604 1009	1647 1015	1726 1049	1782 1071	1849 1104	1877 1147	1869 1167
22	Средняя мощность электропоездов инвентарного парка, кВт	5099	5099	5099	5099	5099	5102	5110
23	Удельный расход электроэнергии электрической тягой на 10 ⁴ т·км брутто, кВт·ч: в грузовом движении в пассажирском движении	93,5 158,2	93,0 160,0	91,6 158,3	91,0 154,1	90,0 149,1	90,5 148,5	90,2 150,8
24	Потребление электроэнергии на тягу поездов без учета потерь, млрд кВт·ч	24,8	26,2	28,8	30,6	31,05	32,7	32,1
25	Количество электроэнергии, возвращенной в сеть, млн кВт·ч	905,0	920,2	906,2	919,1	873,3	843,6	909,5
26	Удельный расход условного топлива на 10 ⁴ т·км брутто тепловозной тягой, кг: в грузовом движении в пассажирском движении	45,1 77,9	45,8 80,3	45,7 81,5	45,7 78,9	45,5 78,6	45,7 77,8	45,5 77,2
27	Себестоимость грузовых перевозок локомотивами, руб./ 10 т·км: при электрической тяге при тепловозной тяге	1,252 2,056	1,795 3,022	1,912 3,512	1,891 3,660	1,841 3,644	2,232 4,418	2,437 4,572

1	2	3	4	5	6	7	8	9
28	Себестоимость пассажирских перевозок локомотивами, руб./10 пасс-км: при электрической тяге при тепловозной тяге	4,149 5,830	6,269 8,035	7,431 9,556	6,691 8,562	7,013 9,726	8,954 10,240	9,482 14,212
29	Производительность труда одного работника на перевозках, тыс. приведенных т·км	1726,6	1874,3	2137,0	2119,1	2628,0	2837,0	3057,0
30	Эксплуатируемый парк электровагонов, ед.	6119	5657	5890	6013	5406	6121	6507
31	Эксплуатируемый парк тепловозов, ед.	6264	6246	6203	6213	6245	6272	6464
33	Средний состав грузового поезда, вагонов: при электрической тяге при тепловозной тяге	64,4 54,2	64,4 54,6	65,0 55,4	66,1 55,9	66,5 56,0	66,9 56,5	66,6 56,9

Источники: 1. Статистический отчет о работе железнодорожного транспорта за 2007 г. Выпуск 16. Департамент информатизации и корпоративных процессов управления. — Москва, 2008. — 351 с.

2. Россия в цифрах 2007 г. Краткий статистический сборник. — Москва, Росстат, 2008. — 510 с.

Перечень нормативных документов

Обозначение документа	Наименование документа
ЦРБ-756 от 26.05.2000	Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации
ГОСТ 16350—80	Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей
ГОСТ 15150—69	Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды
ГОСТ 17.516.1—90	Изделия электротехнические. Условия эксплуатации в части воздействия механических факторов внешней среды
ГОСТ 9238—83	Габариты приближения строений и подвижного состава железных дорог колеи 1520/1524 мм
ГОСТ 9219—88	Аппараты электрические тяговые. Общие технические условия
ГОСТ 12.2.056—81	Система стандартов безопасности труда. Электро-возы и тепловозы колеи 1520 мм. Требования безопасности
ГОСТ 22896—77	Покрытия лакокрасочные электровозов магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Технические условия
ФТС ЖТ ЦТ 04—98	Федеральные требования по сертификации на железнодорожном транспорте. Технический регламент. Электровозы. Требования по сертификации
	Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм. Утверждены МПС России в 1998 г.
ЦП/774	Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути. Утверждена МПС России 01.07.2000 г.
ИЦЖТ ТМ-19-001—91	Типовая методика испытаний подвижного состава по воздействию на путь
ОСТ 24.050.16—85	Вагоны пассажирские. Методика определения плавности хода

Обозначение документа	Наименование документа
ГОСТ 14782—86	Контроль неразрушающий. Сварные соединения. Методы ультразвуковые
ГОСТ 21105—87	Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод
ГОСТ 11018—87	Колесные пары для тепловозов и электровозов железных дорог колеи 1520 мм. Технические условия
ЦТ/329	Инструкция по формированию и содержанию колесных пар тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Утверждена МПС России 14.06.95 г.
ГОСТ Р51175—98	Колеса зубчатые тяговых передач магистральных локомотивов
	Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части мотор-вагонного подвижного состава железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм. Утверждены МПС России в 1997 г.
ОСТ 24.149.03—89	Колеса зубчатых передач тягового подвижного состава магистральных железных дорог. Технические требования
ЦТ-ЦВ-ЦП/581 от 4.08.1998 г.	Правила надзора за воздушными резервуарами подвижного состава железных дорог Российской Федерации
ЦТ-533 от 27.01.1998 г.	Инструкция по обслуживанию, ремонту и испытанию тормозного оборудования локомотивов и мотор-вагонного подвижного состава
ЦТ-ЦЭ 844	Инструкция о порядке использования токоприемников электроподвижного состава при различных условиях эксплуатации. Утверждена МПС России 03.08.2001 г.
ГОСТ 6962—75	Транспорт, электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений
ГОСТ 13109—97	Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения
ЦТНЛ-4 от 25.03.1998 г.	Технические требования к показателям качества электроэнергии на ЭПС и устройствах тягового электроснабжения на электрифицированных железных дорогах переменного тока

Обозначение документа	Наименование документа
ГОСТ 2582—81Е	Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия
ГОСТ 29205—91	Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от электротранспорта. Нормы и методы испытаний
ГОСТ 16842—82	Радиопомехи промышленные. Общие методы испытаний источников радиопомех
ЦШ/4783 утв. 22.12.1989 г.	Правила и нормы по оборудованию магистральных и маневровых локомотивов, электро- и дизель-поездов средствами радиосвязи и помехоподавляющими устройствами
ОСТ 32. 146—2000	Аппаратура железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. Общие технические условия
ОСТ 160.801.066—83	Электровозы. Монтаж электрический проводов, кабелей и шин. Общие технические требования
ТУ 16-705.465—87	Провода и кабели для подвижного состава, рельсового транспорта и троллейбусов. Технические условия
СН и ЭТ ЦУВСС МПС РФ 6/35—98	Тяговый и мотор-вагонный подвижной состав железнодорожного транспорта. Санитарные нормы и эргономические требования к проектированию кабин и оборудования тягового и мотор-вагонного подвижного состава железнодорожного транспорта
СН ЦУВСС МПС РФ 6/27—96	Подвижной состав железнодорожного транспорта. Санитарные правила, регламентирующие физические и химические факторы среды на подвижном составе железнодорожного транспорта на уровнях, обеспечивающих безопасность работающих и пассажиров
ГОСТ 12.1.003—83	Шум. Общие требования безопасности
ОСТ 32.97—87	Инфразвук в кабинах машиниста тягового подвижного состава железных дорог. Допустимые уровни и методы измерения
ОСТ 32.120—98	Нормы искусственного освещения объектов железнодорожного транспорта
ГОСТ 12.2.006—87	Безопасность аппаратуры электронной и сходных с ней устройств, предназначенных для аналогичного и общего применения. Общие требования и методы испытания

Обозначение документа	Наименование документа
ПДУ 3206	Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц. МЗ СССР, 1985 г.
СНиП 5802—91	Санитарные нормы и правила выполнения работ в условиях воздействия электрических полей промышленной частоты (50 Гц)
СН 3086—84	Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест
ЦТ-ЦУО/175 от 27.04. 1993 г.	Инструкция по обеспечению пожарной безопасности на локомотивах и мотор-вагонном подвижном составе
ЦТ-6 от 29.12.1995 г.	Общие требования к противопожарной защите тягового подвижного состава с дополнениями и изменениями
Утверждено ЦТ МПС России 28.12.2000 г.	Руководство по обеспечению пожарной безопасности эксплуатируемого тягового подвижного состава
ГОСТ 27471—87	Машины электрические вращающиеся. Термины и определения

**Пример расчета и выбора силовых полупроводниковых
приборов тягового преобразователя тепловоза 2ТЭ25А**

1. Исходные данные для расчета. Преобразователь частоты состоит из неуправляемого выпрямителя, на вход которого поступает трехфазное напряжение от одной из обмоток тягового генератора АСТГ2-2800/400-1000 У2, а к выходу подключено параллельно три АИН для индивидуального питания тяговых асинхронных двигателей. Исходные данные для расчета, полученные из условий обеспечения заданной тяговой характеристики тепловоза, приведены в таблице.

Параметр	Значение
Действующее значение линейного напряжения источника питания /максимальное значение, В	1450/1460
Максимальная частота источника питания, Гц	100
Коэффициент полезного действия генератора, %	95,5
X_{drr} — сверхпереходное индуктивное сопротивление генератора по продольной оси на частоте 100 Гц, Ом	0,35
X_2 — индуктивное сопротивление обратной последовательности генератора на частоте 100 Гц, Ом	0,17
Мощность АТД, кВт	350
Действующее значение линейного напряжения АТД (в точке выхода на полную мощность/максимальное), В	615/1410
Действующее значение фазного тока АТД (в точке выхода на полную мощность/пусковое), А	420/470
Коэффициент мощности АТД (в точке выхода на полную мощность), о.е.	0,86
Коэффициент полезного действия АТД (в точке выхода на полную мощность), %	91
Схема соединения фаз двигателей	«Звезда»
Частота питания АТД в точке выхода на полную мощность при новом колесе, Гц	17,4
Частота ШИМ-модуляции для расчетной точки, Гц	600
Метод модуляции для расчетной точки выхода на полную мощность	Симметричный синусоидальный ШИМ
Режим работы	Продолжительный
Коэффициент полезного действия преобразователя (заданный), не менее	0,97

Цель расчета — выбрать тип полупроводниковых приборов, рассчитать тепловые потери в них, определить тепловое сопротивление «охладитель—окружающая среда» для последующего выбора и расчета системы охлаждения.

2. Выбор силовых полупроводниковых приборов выпрямителя и расчет потерь в выпрямителе.

2.1. Активная мощность на выходе выпрямителя, кВт:

$$P_{\text{ва}} = \frac{3P_{\text{н}}}{\eta_{\text{аин}} \eta_{\text{ад}}} = \frac{3 \cdot 350}{0,97 \cdot 0,91} = 1\,190\,000 \text{ [В} \cdot \text{А]},$$

где $P_{\text{н}} = 350$ кВт — мощность на валу АТД;

$\eta_{\text{аин}} = 0,97$ — КПД АИН;

$\eta_{\text{ад}} = 0,91$ — КПД АТД.

2.2. Значение U_{dc} с учетом падения напряжения в коммутирующих реактансах и в выпрямителе

$$U_{\text{dc}} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{\Phi} \left(1 - \frac{X_{\text{сг}} I_{\text{д}}}{\sqrt{6} U_{\Phi}} \right) - 2\Delta U,$$

где $X_{\text{сг}} = (X_{\text{дт}} + X_2)/2$ — коммутирующее реактивное сопротивление; $X_{\text{сг}} = (0,35 + 0,17)/2 = 0,26$ [Ом];

$\Delta U = 1,5$ В — падение напряжения в вентиллях (предварительно выбранное значение).

Выпрямленный ток без учета падения напряжения в коммутирующих реактансах и выпрямителе (предварительная оценка):

$$I_{\text{д}} = P_{\text{ва}} / 1,35 \cdot U_{\text{л}} = 1\,190\,000 / 1,35 \cdot 1450 = 608 \text{ [А]}.$$

Получаем

$$U_{\text{dc}} = \frac{3\sqrt{6}}{3,14} \cdot \frac{1450}{\sqrt{3}} \cdot \left(1 - \frac{0,26 \cdot 608 \cdot \sqrt{3}}{\sqrt{6} \cdot 1450} \right) - 2 \cdot 1,5 = 1800 \text{ [В]}.$$

Тогда значение U_{dc} на холостом ходу составит $U_{\text{dcxx}} = 1953$ [В].

2.3. Уточненное значение тока $I_{\text{д}}$ равно

$$I_{\text{д}} = 1\,190\,000 / 1800 = 660 \text{ [А]}.$$

2.4. Среднее значение тока через каждый вентиль

$$I_{\text{F}} = I_{\text{д}} / 3 = 660 / 3 = 220 \text{ [А]}.$$

2.5. Амплитуда обратного напряжения на каждый вентиль

$$U_R = 1,05 \cdot 2,34 \cdot U_{л \max} / \sqrt{3} = 1,05 \cdot 2,34 \cdot 1460 / \sqrt{3} = 2073 \text{ [В]}.$$

2.6. По среднему току и обратному напряжению выбираем с запасом диодный модуль фирмы Mitsubishi типа RM1200HE-66S с параметрами:

- максимальное обратное напряжение 3300 В;
- среднее значение тока через вентили 1200 А;
- пороговое напряжение $V_{TO} = 1 \text{ В}$;
- дифференциальное сопротивление $r_m = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$;
- энергия потерь при восстановлении запирающих свойств $Erec(i_F) = 0,42 \text{ Дж}$;
- тепловое сопротивление «кристалл—корпус» диода $R_{jc} = 0,02 \text{ К/Вт}$;
- тепловое сопротивление «корпус—охладитель» диода $R_{cf} = 0,015 \text{ К/Вт}$;

2.7. Мощность тепловых потерь в модуле выпрямителя:

$$P_{VD} = U_{TO} I_F + r_m K_\Phi^2 I_F^2;$$

где $K_\Phi = \sqrt{3}$ — коэффициент формы тока.

Находим

$$P_{VD} = 1 \cdot 220 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot (\sqrt{3})^2 \cdot 220^2 = 438 \text{ [Вт]}.$$

2.8. Полные статические потери мощности в выпрямителе

$$P_{SVD} = 6 \cdot P_{VD} = 6 \cdot 438 = 2628 \text{ [Вт]}.$$

2.9. Динамические потери мощности в выпрямителе при токе I_F .

$$P_{VDSW} = 6 Erec(I_F) \cdot f_T = 0,42 \cdot 100 = 252 \text{ [Вт]},$$

где f_T — частота питающего напряжения.

2.10. Полные потери мощности в выпрямителе

$$P_{\Sigma VD} = P_{SVD} + P_{VDSW} = 2628 + 252 = 2880 \text{ [Вт]}.$$

2.11. Найденная мощность потерь используется для определения максимального значения теплового сопротивления «охладитель — окружающая среда», при котором будет обеспечена температура кристаллов выпрямительных диодов не выше предельно допустимой (пример расчета приведен далее в п. 3).

3. Расчет АИН

3.1. В тяговом режиме ток каждого транзисторного модуля определяется фазным током АТД. Если принять ток нагрузки синусоидальным, то его максимальное (пиковое) значение определяется из следующего выражения:

$$I_{\sqrt{Tm}} = 1,1 \cdot \sqrt{2} \cdot I_s = 1,1 \cdot \sqrt{2} \cdot 470 = 729 \text{ [A]},$$

где 1,1 — коэффициент, учитывающий пульсацию фазного тока;

I_s — действующее значение максимального пускового тока АТД.

3.2. По напряжению на выходе выпрямителя на холостом ходу U_{dcxx} , по току $I_{\sqrt{Tm}}$, а также учитывая частоту ШИМ-модуляции (до 1 кГц), выбираем предварительно с необходимым запасом (до выполнения теплового расчета) ближайший удовлетворяющий указанному условию IGBT-модуль фирмы «Еурес» FZ1200R33KF2, который характеризуется относительно низким значением статических и динамических потерь при данной частоте ШИМ.

Основные параметры модуля:

— максимальное прямое напряжение в закрытом состоянии 3300 В;

— среднее значение тока через транзистор 1200 А;

— пороговое напряжение транзистора $V_{TO} = 1,5 \text{ В}$;

— дифференциальное сопротивление транзистора $r_m = 0,0021 \text{ Ом}$;

— пороговое напряжение антипараллельного диода $V_{TOD} = 1,25 \text{ В}$;

— дифференциальное сопротивление диода $r_{md} = 0,00115 \text{ Ом}$;

— энергия потерь в транзисторе при включении $E_{on}(i_c) = 2,88 \text{ Дж}$;

— энергия потерь в транзисторе при выключении $E_{off}(i_c) = 1,53 \text{ Дж}$;

— энергия потерь при восстановлении запирающих свойств антипараллельного диода $E_{rec}(i_F) = 1,5 \text{ Дж}$;

— тепловое сопротивление «кристалл — корпус транзистора IGBT-модуля» $R_{jct} = 0,0085 \text{ К/Вт}$;

— тепловое сопротивление «кристалл — корпус диода IGBT-модуля» $R_{jcd} = 0,017 \text{ К/Вт}$;

— тепловое сопротивление «корпус IGBT-модуля — охлажда-
тель» $R_{ch} = 0,004 \text{ К/Вт}$.

Коэффициент загрузки модуля по максимальному току составит 0,61, по напряжению 0,63, что соответствует рекомендациям фирмы-производителя данных модулей.

3.3. Расчет потерь мощности в АИН

3.3.1. Статические потери в транзисторе

$$P_{ST} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_{CE(sat)}(i_c) \cdot i_c(t) dt;$$

где $U_{CE(sat)}$ — напряжение на транзисторе в открытом состоянии;

$i_c(t)$ — ток через транзистор (мгновенное значение);

T — период выходного тока АТД.

После интегрирования данного выражения при условии использования симметричной синусоидальной ШИМ-модуляции получим:

$$\begin{aligned} P_{ST} &= \frac{1}{2} \left(U_{TO} \frac{I_m}{\pi} + r_m \frac{I_m^2}{4} \right) + m \cdot \cos \varphi \cdot \left(U_{TO} \frac{I_m}{8} + \frac{1}{3\pi} r_m I_m^2 \right) = \\ &= \frac{1}{2} \left(1,5 \cdot \frac{592}{\pi} + 0,0021 \cdot \frac{592^2}{4} \right) + 0,48 \cdot 0,86 \cdot \left(1,5 \cdot \frac{592}{8} + \frac{1}{3\pi} \cdot 0,0021 \cdot 592^2 \right) = \\ &= 311 \text{ [Вт]}, \end{aligned}$$

где $I_m = \sqrt{2} \cdot 420 = 592 \text{ [A]}$ — амплитудное значение синусоидального тока через транзистор в расчетной точке (выход на полную мощность);

$m = \frac{\sqrt{2} \cdot 615}{1800} = 0,48$ — глубина модуляции для расчетной точки;

$\cos \varphi = 0,86$ — коэффициент мощности нагрузки (АТД).

3.3.2. Статические потери мощности в антипараллельном диоде

$$P_{FD} = \frac{1}{T} \int_{T/2}^T U_F(i_F) \cdot i_F(t) dt,$$

где $U_F(i)$ — падение напряжения на антипараллельном диоде;

$i_F(t)$ — ток через диод (мгновенное значение).

После интегрирования данного выражения при указанных условиях получим:

$$\begin{aligned} P_{FD} &= \frac{1}{2} \left(U_{TOD} \frac{I_m}{\pi} + r_{md} \frac{I_m^2}{4} \right) - m \cdot \cos \varphi \cdot \left(U_{TOD} \frac{I_m}{8} + \frac{1}{3\pi} r_{md} I_m^2 \right) = \\ &= 112 \text{ [Вт]}, \end{aligned}$$

3.3.3. Динамические потери в транзисторе

$$P_{SW} = \frac{1 + \cos \varphi}{2\pi} f_{sh} [E_{on}(I_H, U_H) + E_{off}(I_H, U_H)] \cdot \frac{I_m}{I_H} \cdot \frac{U_{dc}}{U_H} =$$

$$= \frac{1 + 0,86}{2\pi} \cdot 600 \cdot [2,88 + 1,53] \cdot \frac{592}{1200} \cdot \frac{1800}{1800} = 505 \text{ [Вт]},$$

где $E_{on}(I_H, U_H)$ — энергия потерь в транзисторе при включении;

$E_{off}(I_H, U_H)$ — энергия потерь в транзисторе при выключении;

$f_{sh} = 600$ Гц — частота ШИМ для расчетной точки.

Для выбранного модуля $I_H = 1200$ А, $U_H = 1800$ В (по справочным данным).

3.3.4. Динамические потери при восстановлении запирающих свойств антипараллельного диода

$$P_{SWD} = \frac{1 + \cos \varphi}{2\pi} f_{sh} [E_{rec}(I, U)] \frac{I_m}{I_H} \cdot \frac{U_{dc}}{U_H} = 132 \text{ [Вт]},$$

где $E_{rec}(I_H, U_H)$ — энергия потерь в диоде при восстановлении запирающих свойств.

Приведенные формулы позволяют выполнить расчет тепловых потерь с достаточной для инженерных расчетов точностью.

Более точный расчет можно выполнить в процессе математического моделирования работы АИН с конкретно выбранным способом ШИМ-модуляции. Можно также рекомендовать специально разработанные производителями силовых полупроводниковых ключей программы расчета потерь в них, например программу *IPOSIM* для ключей фирмы Eupes, *MelcoSim* для ключей фирмы Mitsubishi, *Semisel* для ключей фирмы Semikron. Недостатки данных программ в том, что они разработаны для конкретных модулей и предполагают определенный способ модуляции (обычно синусоидальный ШИМ).

В соответствии с указанными формулами для примера выполнен расчет потерь в инверторе для одной точки тяговой характеристики (выход на полную мощность). На практике расчет потерь следует выполнить при различных режимах работы АИН, в том числе при пуске и режиме работы с низкой (до 1—3 Гц) выходной частотой, при которой кристалл силового ключа успевает перегреться под действием амплитудного, а не среднего значения тока.

Дальнейший расчет ведется для наиболее нагруженного в тепловом отношении режима.

3.3.5. Общие потери мощности в одном IGBT-транзисторе:

$$P_{\text{IGBT}} = P_{\text{ST}} + P_{\text{SW}} = 311 + 505 = 816 \text{ [Вт]}.$$

3.3.6. Общие потери мощности в одном антипараллельном диоде модуля:

$$P_{\text{D}} = P_{\text{SD}} + P_{\text{SWD}} = 112 + 132 = 244 \text{ [Вт]}.$$

3.3.7. Полные потери в одном IGBT-модуле

$$P_{\text{mod}} = P_{\text{IGBT}} + P_{\text{D}} = 816 + 244 = 1060 \text{ [Вт]}.$$

3.3.8. Полные потери в АИН

$$P_{\text{AIN}} = 6P_{\text{mod}} = 6 \cdot 1060 = 6360 \text{ [Вт]}.$$

3.3.9. Полные потери в полупроводниковых приборах преобразователя с учетом потерь в выпрямителе АИН для указанной расчетной точки составят:

$$P_{\text{pch}} = 3P_{\text{AIN}} + P_{\Sigma\text{VD}} = 3 \cdot 6360 + 2880 = 21\,960 \text{ [Вт]}.$$

4. Расчет требуемого теплового сопротивления «охладитель—окружающая среда»

Необходимо определить максимальное значение теплового сопротивления «охладитель—окружающая среда», при котором не будет превышена допустимая температура кристаллов IGBT-модулей. В данном примере принимаем указанную температуру для IGBT-модулей 115 °С (с запасом 10 °С до предельной).

Эквивалентная тепловая модель одного транзистора в полумосте АИН с учетом размещения кристаллов в модуле и модуля на охладителе приведена на рис П1.

Определим падение температур от диода и от транзистора до подложки.

$$\Delta T_d = P_{\text{D}} R_{\text{jcd}} = 244 \cdot 0,017 \text{ К/Вт} = 4,15 \text{ К};$$

$$\Delta T_t = P_{\text{IGBT}} R_{\text{jct}} = 816 \cdot 0,0085 \text{ К/Вт} = 6,93 \text{ К}.$$

Таким образом, наиболее высокую температуру при работе будет иметь кристалл транзистора.

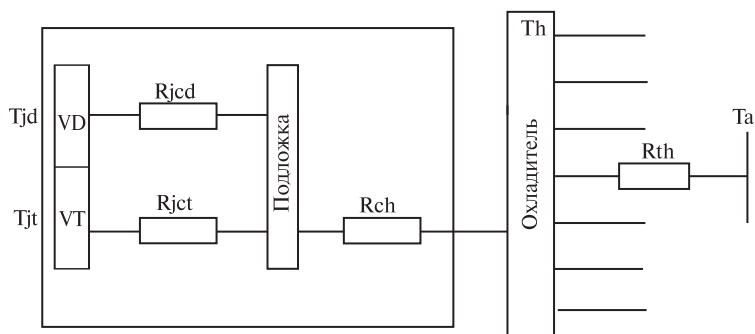


Рис. П1. Эквивалентная тепловая модель IGBT-модуля на охладителе

При заданной температуре охлаждающей среды $T_a = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ и допустимой температуре нагрева полупроводникового кристалла IGBT-модуля $T_{jt} = 115\text{ }^{\circ}\text{C}$ определим допустимое тепловое сопротивление «основание охладителя — охлаждающая среда» для одного транзистора:

$$R_{th} = \frac{T_{jt} - T_a - P_{\text{IGBT}} R_{jct} - P_{\text{mod}} R_{ch}}{P_{\text{mod}}} =$$

$$= \frac{115 - 45 - 816 \cdot 0,0085 - 1060 \cdot 0,004}{1060} = 0,05549 \text{ [K/Wt]}.$$

В предположении, что модули равномерно распределены по поверхности всего охладителя, а также в зависимости от конструктивного исполнения АИН требуемое сопротивление будет в n раз меньше полученного, где n — количество модулей на охладителе.

Далее по значению R_{th} выполняется расчет охладителя (радиатора). Он может быть с воздушным, испарительным или жидкостным охлаждением. В зависимости от результатов расчета охладителя принимается окончательное решение о типе используемых полупроводниковых приборов. В случае перегрева приборов возможен переход на более мощные приборы или на параллельное их соединение и, наоборот, при наличии большого запаса по температуре кристалла следует выбрать приборы с меньшим током. При этом необходимо весь процесс расчета повторить.

Рекомендуемая литература

1. *Бурков А.Т.* Электронная техника и преобразователи: учебник для вузов ж.-д. транспорта. — М.: Транспорт, 2001. — 464 с.
2. *Вольдек А.И., Попов В.В.* Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учебник для вузов. — СПб.: Питер, 2007. — 320 с.
3. *Грищенко А.В., Козаченко Е.В.* Новые электрические машины локомотивов. — М.: ГОУ «УМЦ ЖДТ», 2008. — 271 с.
4. *Грищенко А.В., Стрекопытов В.В.* Электрические машины и статические преобразователи подвижного состава / Под ред. А.В. Грищенко. — М.: Изд. центр «Академия», 2005. — 320 с.
5. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов / Ю.А. Бахвалов, Г.А. Бузало, А.А. Зарифьян и др. — М.: Маршрут, 2006. — 374 с.
6. *Киржнер Д.Л.* Требования к новому тяговому подвижному составу // Железнодорожный транспорт. — 2007. — № 8. — С. 13–14.
7. *Колпахчян П.Г.* Адаптивное управление асинхронным тяговым приводом магистральных электровозов. — Ростов н/Д: Изд-во журн. «Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион», 2006. — 131 с.
8. *Колпахчян П.Г., Петров П.Ю.* Анализ способов управления асинхронным тяговым двигателем на электроподвижном составе // Вестник ВЭЛНИИ. — 2005. — № 2(49). — С. 174–187.
9. Компьютерная модель электровоза как управляемой электромеханической системы / Ю.А. Бахвалов, А.А. Зарифьян, П.Г. Колпахчян, П.Ю. Петров, В.П. Янов // Вестник РГУПС. — 2009. — № 3. — С. 22–31.
10. *Луков Н.М., Космодамианский А.С.* Автоматические системы управления локомотивов — М.: ГОУ «УМЦ ЖДТ», 2007. — 429 с.
11. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. / Т. IV-23. — Подвижной состав железных дорог / П.С. Анисимов, В.А. Винокуров, В.И. Воробьев и др.; под ред. Б.А. Лёвина, П.С. Анисимова. — М.: Машиностроение, 2008. — 656 с.

12. Микропроцессорные системы автоматического регулирования электропередачи тепловозов: учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта / А.В. Грищенко, В.В. Грачев, С.И. Ким, Ю.И. Клименко и др.; под ред. А.В. Грищенко. — М.: Маршрут, 2004. — 172 с.

13. Моделирование электромеханической системы электровоза с асинхронным тяговым приводом / Ю.А. Бахвалов, А.А. Зарифьян, П.Г. Колпахчян и др. — М.: Транспорт, 2001. — 286 с.

14. *Перфильев К.С.* Алгоритм векторного управления тяговым электроприводом с трехуровневым инвертором напряжения // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава: Материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., 17–19 июня 2003 г. — Новочеркасск, 2003. — С. 126–127.

15. *Поздеев А.Д.* Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах. — Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. — 172 с.

16. *Сотников Е.А.* История и перспективы мирового и российского железнодорожного транспорта (1800–2100 гг.). — М.: Интекс, 2005. — 112 с.

17. *Стрекопытов В.В., Грищенко А.В., Кручек В.А.* Электрические передачи локомотивов: учебник для вузов ж.-д. транспорта / Под ред. В.В. Стрекопытова. — М.: Маршрут, 2003. — 310 с.

18. Теория и конструкция локомотивов: учебник для вузов ж.-д. транспорта / Г.С. Михальченко, В.Н. Кашников, В.С. Коссов, В.А. Симонов; под ред. Г.С. Михальченко. — М.: Маршрут, 2006. — 584 с.

19. Технология производства тяговых двигателей электровозов / Н.И. Березинец, В.И. Бочаров, В.И. Голобородько и др. — Новочеркасск: Наутилус, 2003. — 574 с.

20. Типы и основные параметры локомотивов. Утверждено распоряжением МПС России № 747р от 27.11.2002.

21. *Kalker J.J.* Rolling contact phenomena: linear elasticity // Reports of the Department of Applied Mathematical Analysis. Report 00-09. — Delft, 2000. — 90 p.

22. *Pogorelov D.Y.* Contemporary Algorithms for Computer Synthesis of Equations of Motion of Multibody Systems // Journal of Computer

and Systems Sciences International (с/с of Tekhnicheskaja Kibernetika). — Wiley, 2005. — V. 44; N. 4. — P. 503–512.

23. Система управления и диагностики электровоза ЭП10 / Под ред. С.В. Покровского. — М.: Интекст, 2009. — 356 с.

24. *Лужнов Ю.М.* Нанотрибология сцепления колес и рельсами. Реальность и возможности — М.: Интекст, 2009. — 176 с.

25. *Суслова К.Н.* Автономные инверторы напряжения. — Новочеркасск: ОАО «ВЭЛНИИ», 2007. — 81 с.

Оглавление

Введение	3
Глава 1. ЭВОЛЮЦИЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛОКОМОТИВОВ	5
1.1. Роль железнодорожного транспорта в экономике Российской Федерации	5
1.2. Программа развития железных дорог РФ до 2030 г.	10
1.3. Этапы развития тягового электропривода локомотивов	12
1.3.1. Электровозы постоянного тока с коллекторными ТЭД постоянного тока	14
1.3.2. Тепловозы с электропередачей постоянного тока.....	21
1.3.3. Электровозы переменного тока с коллекторными ТЭД пульсирующего тока.....	33
1.3.4. Тепловозы с электропередачей переменного постоянного тока	41
1.4. Применение асинхронного тягового привода на перспективном тяговом подвижном составе	48
1.4.1. Электровозы с асинхронным тяговым приводом	48
1.4.2. Тепловозы с электрической передачей переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями	54
1.5. Требования к перспективному тяговому подвижному составу. Типажи	59
Глава 2. АСИНХРОННЫЕ ТЯГОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ	69
2.1. Устройство и принцип работы асинхронного двигателя	69
2.2. Конструкции и характеристики асинхронных тяговых двигателей	73
2.2.1. Особенности конструкции АТД электровозов	73
2.2.2. Особенности конструкции АТД тепловозов	96
2.3. Условия работы тяговых двигателей подвижного состава железных дорог. Технические требования	103
Глава 3. ТЯГОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛОКОМОТИВОВ	114
3.1. Элементная база тяговых преобразователей	115

3.2. Применение силовых полупроводниковых приборов на тяговом подвижном составе	122
3.3. Тяговые трансформаторы и преобразователи электровозов.....	127
3.3.1. Входные преобразователи электровозов постоянного тока	127
3.3.2. Тяговые трансформаторы электровозов переменного тока	132
3.3.3. Входные преобразователи электровозов переменного тока.....	138
3.3.4. Автономные инверторы напряжения	148
3.3.5. Автономные инверторы тока	172
3.3.6. Пример конструкции тягового преобразователя электровоза.....	175
3.4. Тяговые генераторы и преобразователи тепловозов	179
3.4.1. Синхронные тяговые генераторы	179
3.4.2. Преобразователи тепловозов.....	186
3.5. Проектирование тяговых преобразователей	193
3.5.1. Системы охлаждения	193
3.5.2. Электромагнитная совместимость	196
3.6. Системы защиты тяговых преобразователей	208
Глава 4. УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ ЛОКОМОТИВОВ.....	210
4.1. Общие положения. Структура системы управления.....	210
4.2. Требования к системе регулирования асинхронного тягового привода с точки зрения реализации силы тяги.....	213
4.2.1. Требования к динамическим показателям системы регулирования силы тяги	213
4.2.2. Влияние динамических показателей привода на тяговые свойства локомотива	217
4.3. Способы управления асинхронным тяговым приводом и их влияние на динамические свойства локомотива	231
4.3.1. Влияние способа регулирования АТД на вид его механической характеристики	231
4.3.2. Уравнения электромагнитных процессов в АТД, применяемые при синтезе системы управления	234
4.3.3. Системы автоматического регулирования АТП при постоянстве частоты скольжения, угла нагрузки и потокосцепления (способы 1—4)	238

4.3.4. Системы векторного управления АТП (способы 5 и 6)	248
4.3.5. Преимущества систем управления с автоматическим поддержанием постоянства магнитного потока	254
4.4. Проектирование системы управления асинхронным тяговым приводом	258
4.4.1. Система автоматического регулирования АТП	258
4.4.2. Синтез системы автоматического регулирования	268
4.4.3. Пример синтеза системы автоматического регулирования асинхронного тягового привода	277
4.4.4. Формирование заданий потокосцепления и момента АТД	286
4.5. Пример построения системы управления асинхронным тяговым приводом тепловоза	292
Глава 5. МЕХАНИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ЛОКОМОТИВОВ С АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ	299
5.1. Особенности конструкции механической части локомотивов с АТП	299
5.2. Несущие кузова	302
5.3. Тележки локомотивов	310
5.3.1. Конструкция тележек пассажирских электровозов с АТП	313
5.3.2. Конструкция тележек грузовых электровозов с АТП	323
5.3.3. Конструкция тележек грузовых тепловозов с АТП	327
5.4. Тяговый привод	330
5.4.1. Механический тяговый привод пассажирских электровозов с АТП	330
5.4.2. Механический тяговый привод грузовых электровозов с АТП	335
5.4.3. Механический тяговый привод грузовых тепловозов с АТП	339
Глава 6. РАСЧЕТЫ И ИСПЫТАНИЯ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ПРИВОДА ЛОКОМОТИВОВ	345
6.1. Компьютерная модель локомотива как управляемой электрохимической системы	345
6.1.1. Структура компьютерной модели	345
6.1.2. Модель механической части	348

6.1.3. Модель электрической части	350
6.1.4. Модель системы управления	354
6.1.5. Результаты моделирования	355
6.2. Испытания асинхронного тягового привода	366
6.2.1. Программы и методы испытания асинхронных тяговых двигателей	366
6.2.2. Стенды для испытаний асинхронного тягового привода под нагрузкой	377
<i>Приложение П1. Основные показатели эксплуатационной работы сети железных дорог России</i>	<i>390</i>
<i>Приложение П2. Перечень нормативных документов</i>	<i>394</i>
<i>Приложение П3. Пример расчета и выбора силовых полупроводниковых приборов тягового преобразователя тепловоза 2ТЭ25А</i>	<i>398</i>
Рекомендуемая литература	406

Учебное издание

Андрющенко Андрей Александрович
Бабков Юрий Валерьевич
Зарифьян Александр Александрович
Кашников Геннадий Филиппович
Колпахчян Павел Григорьевич
Перфильев Константин Степанович
Янов Виктор Петрович

АСИНХРОННЫЙ ТЯГОВЫЙ ПРИВОД ЛОКОМОТИВОВ

Под редакцией А.А. Зарифьяна

Учебное пособие

Подписано в печать 28.10.2011 г.
Формат 60×84/16. Печ. л. 25,75. Тираж 500 экз. Заказ
ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию
на железнодорожном транспорте»
105082, Москва, ул. Бакунинская, д. 71
Тел.: +7 (495) 739-00-30,
e-mail: info@umczdt.ru,
<http://www.umczdt.ru>
